Diseño hidráulico de plantas de tratamiento de agua potable

Miguel Araque Arellano
(Coordinador)

Universidad Politécnica Salesiana





Diseño hidráulico de plantas de tratamiento de agua potable

Miguel Araque Arellano (coord.)

ARAQUE ARELLANO, M., ed. *Diseño hidráulico de plantas de tratamiento de agua potable* [online]. Quito: Editorial Abya-Yala, 2022, 126 p. ISBN: 978-9978-10-638-9.
https://doi.org/10.7476/9789978108208.



Diseño hidráulico de plantas de tratamiento de agua potable

Miguel Araque Arellano (Coordinador)

Diseño hidráulico de plantas de tratamiento de agua potable



2022

Diseño hidráulico de plantas de tratamiento de agua potable

© Miguel Araque Arellano (Coordinador)

Autores y autoras: Edwin Arias, Miguel Araque, Michelle Vásconez, Estefanía Avilés, Freddy Cuarán, Diana García, Diana Álvarez, Claudia Prehn, Ximena Borja, Jessica Valdiviezo y Graciela Fernández

1ra edición:	© Universidad Politécnica Salesiana Av. Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja Cuenca-Ecuador Casilla: 2074 P.B.X. (+593 7) 2050000 Fax: (+593 7) 4 088958 e-mail: rpublicas@ups.edu.ec www.ups.edu.ec CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Diagramación:	Editorial Universitaria Abya-Yala Quito-Ecuador
ISBN UPS:	978-9978-10-637-2
ISBN Digital:	978-9978-10-638-9
Impresión:	Editorial Universitaria Abya-Yala
	Quito-Ecuador
Tiraje:	300 ejemplares

Impreso en Quito-Ecuador, marzo de 2022

Publicación arbitrada de la Universidad Politécnica Salesiana

Índice

Si tienes un sueño en tu corazón
Y de verdad crees en él,
Corres en riesgo de que
Se convierta en realidad

Walt Disney

Dedicatoria

Miguel: A mi madre Cecilia Arellano

Prefacio

Debido a la importancia del tema para la formación integral de excelencia del ingeniero ambiental, los autores y las autoras presentamos este trabajo con la certeza de que contribuimos con nuestra experiencia docente y profesional a la formación de la juventud de nuestro país.

En este contexto, el primer capítulo se refiere a la importancia del cuidado de las fuentes de agua dulce en la naturaleza y cuáles serían las medidas de mitigación y prevención que podrían aplicarse.

En el segundo capítulo se presentan los conceptos básicos de la química del agua, que son la antesala para el diseño de las unidades de la planta de tratamiento de agua potable que tienen gran demanda en nuestro país.

En el tercero se presenta en detalle las bases de diseño de las unidades que comprende una planta de tratamiento de agua potable, considerando que para cada una de las unidades se plantea un ejemplo de diseño.

En el cuarto capítulo se presenta la epidemiología hídrica y la prevención de enfermedades de transmisión hídrica, así como la forma en que se produce la contaminación, cómo se adquiere la enfermedad, cómo se producen las epidemias y la prevención de enfermedades.

Además, en el quinto capítulo se presenta la gestión integral de los recursos hídricos y la importancia de la agricultura en el cui-

dado y aprovechamiento de las cuencas hidrográficas de gran importancia en nuestro país.

Por último, se presenta un glosario de términos relacionados con las unidades de una planta de tratamiento de agua potable.

Asimismo, expresamos nuestro reconocimiento y agradecimiento a Karina Pazmiño Pacheco directora de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Politécnica Salesiana por el apoyo brindado para la publicación de este libro.

Capítulo 1
El agua en la naturaleza

1.1 Importancia del agua

El agua es el líquido vital para la subsistencia de la vida en nuestro planeta ya que garantiza la vida del hombre y de los animales, curiosamente el 70 % de nuestro planeta es agua al igual que nuestro cuerpo.

Es un recurso natural crucial para la humanidad y es por ello que nuestros ríos, lagos, aguas subterráneas y aguas costeras deben ser utilizadas de forma sustentable, pensando siempre en las nuevas generaciones.

Se presentan algunas razones expuestas por la Organización de Naciones Unidas para el cuidado y la conservación de las fuentes de agua dulce en nuestro planeta:

- Millones de personas carecen de agua apta para el consumo humano.
- El acceso al agua potable es un derecho humano expuesto en la carta constitutiva de la ONU.
- Cuatro billones de personas a nivel mundial carecen de acceso a servicios básicos de saneamiento.
- Cada día, 1000 niños mueren por causa de enfermedades causadas por el consumo de agua de mala calidad.

Para concientizar la importancia del líquido vital, la Organización de la Naciones Unidas ha establecido el día 22 de marzo como "Día Mundial del Agua".

1.2 Clasificación de las aguas naturales

Las aguas en la naturaleza se clasifican en tres grupos según el ciclo hidrológico. La clasificación de las aguas naturales es la siguiente:

- *Aguas pluviales:* constituyen las aguas que proceden de lluvias, nevadas y granizadas.
- *Aguas superficiales:* constituyen las aguas que provienen de ríos, riachuelos, desagües de lagos y desagües de reservorios
- *Aguas subterráneas:* constituyen las aguas de los acuíferos los mismos que se definen como terrenos permeables que se localizan en las cercanías de la superficie terrestre donde circula y se acumula el agua dulce.
- Según su estructura se clasifican en: acuíferos libres y acuíferos confinados.
- Según su textura se clasifican en: porosos y fisurales.
- Según su comportamiento hidrodinámico en: acuíferos, acuitardos, acuicludos y acuifugos.
- Según su comportamiento hidráulico en: acuífero libre, acuífero confinado, acuífero semi-confinado y acuífero costero.

1.3 Calidad del agua en función del ciclo hidrológico

El agua totalmente pura en la naturaleza no existe, es decir, en cada etapa del ciclo hidrológico existen factores externos que inciden en su calidad. A continuación, se detalla todo el proceso:

- Al momento que el agua cae en forma de lluvia disuelven los gases de la atmósfera como el oxígeno y el gas carbónico y adicionalmente transporta polvo hacia la superficie terrestre. Es necesario acotar que la lluvia ácida se produce en el

momento que el agua de lluvia se combina con el óxido de nitrógeno y el dióxido de azufre que provienen de centrales térmicas y del funcionamiento de los motores a gasolina.

- El agua lluvia al momento que cae a la superficie terrestre dependiendo de las condiciones del suelo, un porcentaje de ella se infiltra y el resto se convierte en escorrentía superficial. Las sustancias químicas de los terrenos influyen en la calidad del agua de escorrentía, formando a veces carbonatos de calcio y magnesio. En los cursos de agua superficiales, la calidad del agua se ve disminuida por la presencia de sustancias orgánicas, inorgánicas y de organismos vivos como algas y protozoarios; debido a la capacidad de transportar material en suspensión, el agua presenta cierto grado de turbidez.

1.4 Impurezas del agua

En general, las aguas superficiales contienen las siguientes impurezas, que se detallan a continuación, considerando su función para definir el tipo de tratamiento más adecuado:

- *En suspensión:*
  - Bacterias
  - Algas
  - Protozoarios
  - Arena
  - Sílice
  - Arcilla
  - Residuos industriales
  - Residuos domésticos

- *En estado coloidal:*
  - Sustancias colorantes
  - Sustancias vegetales
  - Sílice

- *En disolución:*
  Sales de calcio
  Sales de magnesio
  Sales de sodio
  Hierro
  Magnesio
  Oxígeno
  CO2

1.5 Características físicas, químicas y bacteriológicas del agua

La calidad del agua superficial y subterránea se encuentra relacionada con la concentración de impurezas que contenga, por lo que es indispensable conocer sus características físicas, químicas y bacteriológicas.

Dichas características pueden determinarse mediante los siguientes análisis:

- *Examen físico:*
  Características organolépticas
  Color
  Olor
  Sabor
  Elementos flotantes
  Temperatura
  Sólidos
  Conductividad
  Radioactividad

- *Análisis químico:*
  pH
  Materia orgánica
  DBO
  DQO

Nitrógeno
Fósforo
Hidrocarburos
Detergentes
Cloro
Fluoruros
Fenoles
Cianuros
Metales
Pesticidas
Herbicidas

- *Examen bacteriológico:*
  Coliformes totales
  Coliformes fecales
  Estreptococos fecales
  Salmonella
  Enterovirus

- *Bacterias patógenas:*
  Acinetobacter
  Aeromonas
  Bacillus
  Burkholderia pseudomallei
  Campylobacter
  Cepas patógenas de Escherichia coli
  Helicobacter pylori
  Klebsiella
  Legionella
  Mycobacterium
  Pseudomonas aeruginosa
  Salmonella
  Shigella
  Staphylococcus aureus
  Tsukamurella

Vibrio
Yersinia

- *Virus patógenos:*
  Adenovirus
  Astrovirus
  Calicivirus
  Enterovirus
  Virus de la hepatitis A
  Virus de la hepatitis E
  Rotavirus y ortorreovirus

- *Protozoos patógenos:*
  Acanthamoeba
  Balantidium coli
  Cryptosporidium
  Cyclospora cayetanensis
  Entamoeba histolytica
  Giardia intestinalis
  Isospora belli

1.6 Contaminación del agua

Los cauces de los ríos que se desplazan a lo largo de las cuencas hidrográficas suelen estar contaminados porque reciben aguas servidas industriales y domésticas; se pueden distinguir las siguientes formas de contaminación:

- *Contaminación física:* producen un impacto estético del paisaje natural, tienen mucha incidencia en la flora y fauna acuática. Incide especialmente en el color de las aguas debido a la presencia de materia orgánica, minerales y compuestos de hierro: desde el punto de vista fisiológico tiene incidencia en el olor y sabor de las aguas; además, las aguas con este tipo de contaminación se caracterizan por tener una temperatura superior a la normal; finalmen-

te, esta contaminación incide en el aumento del pH de las aguas superficiales.

- *Contaminación exclusivamente química:* se debe a la presencia de sustancias químicas en concentraciones considerables que inciden en la presencia de microorganismos nocivos que deterioran la calidad de las aguas. Podemos mencionar los siguientes: compuestos de minerales tóxicos, ácidos, álcalis, detergentes, petróleo, aceites, grasas de azufre o de nitrógeno.
- *Contaminación bioquímica:* se caracteriza por la degradación del agua por la presencia de elementos químicos y biológicos.
- *Contaminación microbiológica:* se produce por la presencia de organismos patógenos que pueden ser bacterias (como shigella, escherichia coli, vibrio), los virus (como virus norwalk y rotavirus) y parásitos.
- *Contaminación radiactiva:* se debe a la presencia de elementos radiactivos en el agua que tienen la capacidad de emitir protones, rayos gamma y electrones desde sus núcleos, lo que constituye la radiactividad.
  Los existentes en la naturaleza son: Torio 232, Uranio 238, Uranio 235; los elementos artificiales son: Torio 233, Uranio 233, Uranio 239, Neptunio 239 y Plutonio 239.

1.7 Necesidad del tratamiento del agua

Tomando en cuenta que el aprovechamiento del agua superficial y subterránea está en función del caudal concesionado por Senagua, este puede ser utilizado para diferentes actividades, por lo que es necesario definir el sistema de tratamiento para cada uno de los usos

A continuación se describen las necesidades de tratamiento en función de los siguientes aspectos:

- *Con respecto a la salud pública:*
  Contaminación directa
  Contaminación indirecta

- *Con respecto a la economía:*
  Pérdidas de valor de los terrenos
  Perjuicios en industrias
  Perjuicios en actividades ganaderas

- *Con respecto a la estética:*
  Mal aspecto
  Mal olor

1.8 Enfermedades relacionadas con el agua

Las enfermedades relacionadas con el agua se producen cuando el agua se contamina con desechos humanos, animales o químicos. Entre las principales enfermedades podemos citar las siguientes:

- *Cólera:* su agente patógeno es Vibrio cholerae, las medidas preventivas que se pueden tomar en cuenta para su tratamiento son: mejor cantidad y calidad del agua, mejor disposición de las excretas en el interior de la vivienda, mejor higiene personal, mejorar la disposición de alimentos dentro del hogar y uso de medicamentos.
- *Fiebre tifoidea:* su agente patógeno es la bacteria Salmonella tipi, las medidas preventivas que se puede considerar para su tratamiento son: ingerir agua potable, los alimentos deben ser preparados con medidas de asepsia, no ingerir alimentos preparados en la calle y no ingerir productos lácteos que no hayan sido pasteurizados.
- *Shigella:* su agente patógeno es Shigella spp. Las medidas preventivas que se pueden tomar en cuenta son: mejorar la calidad del agua en el hogar, mejorar la disposición de excretas dentro de la vivienda, no ingerir alimentos ni bebidas de una dudosa procedencia.

- *Poliomielitis:* su agente patógeno es poliovirus, considerando que nuestro país fue declarado libre de esta enfermedad desde hace 25 años, con el apoyo de la Organización Mundial de la Salud y la Organización Panamericana de la Salud.
- *Meningitis:* su agente patógeno es Neisseria meningitidis, Haemophilus influenzae, Streptococcus pneumoniae, estreptococos del grupo B, Listeria monocytogenes, bacilos gramnegativos, las medidas preventivas para combatir esta enfermedad son: mantener una buena higiene personal y bucal, mantener una excelente higiene en el hogar, lavado frecuente de manos.
- *Hepatitis:* su agente patógeno es el virus de la hepatitis A, las medidas preventivas que se pueden considerar son: mayor disponibilidad de agua en el hogar, mayor limpieza en el hogar y la vacunación.
- *Diarrea:* su agente patógeno es rotavirus agente de Norwalk, las medidas preventivas que se deben considerar son: mejorar la calidad y la cantidad de agua, mejor disposición de excretas y consumir alimentos correctamente preparados.

1.9 Aspectos sanitarios a tomar en cuenta en el abastecimiento de agua

Las medidas que deben ser tomadas en cuenta para el abastecimiento del agua potable en una ciudad o población son las siguientes:

- Controlar periódicamente la calidad físico química del agua captada en la fuente de abastecimiento.
- Controlar periódicamente el estado de la línea de conducción desde el sitio de captación hasta la planta de tratamiento de agua potable.
- Realizar la potabilización del agua considerando las recomendaciones técnicas de la norma internacional de calidad ISO 9001.

- Verificar el buen estado de las tuberías de distribución de agua en las ciudades o poblados considerando el establecimiento de puntos de poscloración teniendo en cuneta su importancia para la calidad del agua potable.
- Emprender campañas de educación ambiental para resaltar la importancia del correcto uso del agua y de las medidas sépticas.

Capítulo 2
Química acuática

2.1 Introducción

La química acuática se ocupa de los fenómenos y procesos químicos que ocurren en las aguas superficiales y subterráneas, que están íntimamente ligados con los microorganismos que posee. Antes de detallar la metodología técnica que debe considerarse en el diseño de las plantas de tratamiento de agua potable, es necesario tomar en cuenta los conceptos básicos de la química acuática.

2.2 Conceptos básicos

2.2.1 Soluciones

Una mezcla homogénea de dos o más sustancias se llama solución o disolución, lo que significa que se forma una nueva sustancia con nuevas propiedades físicas y químicas, es decir, las sustancias originales pierden sus propiedades.

Las soluciones o disoluciones tienen las siguientes características:

- El soluto y el solvente no pueden separarse por métodos físicos como la decantación o la filtración porque se han formado nuevos enlaces químicos.
- A simple vista no se puede distinguir en cuál es soluto de la solución y solvente.

Las soluciones o disoluciones se clasifican de la siguiente manera:

Diluidas: son soluciones químicas en las que el soluto no ha alcanzado la concentración máxima en relación con el solvente. En química general, en este tipo de soluciones existe un equilibrio dinámico en el que la velocidad de disolución del solvente por el soluto es mayor que la velocidad de recristalización.

Los factores que afectan la solubilidad son: temperatura, presión, composición química y factores mecánicos.

Ejemplos de este tipo de soluciones:

- Una cucharada de azúcar en una taza de café.
- La niebla en páramos es una solución insaturada a vapor de agua en el aire.
- Ácido clorhídrico en agua a una molaridad de 0,01 molar.
- Bebidas alcohólicas es una solución insaturada de etanol en agua.

• *Concentradas:* son las soluciones químicas en las cuales existe gran cantidad de soluto con relación a la cantidad de solvente.

Los factores que afectan la solubilidad son: osmolaridad, abatimiento de la presión de vapor, descenso del punto crioscopio, elevación del punto de ebullición.

Ejemplos de este tipo de soluciones:

- El agua del mar tiene fuertes concentraciones de diferentes sales.
- En el momento que una persona se encuentra deshidratada, su orina presenta fuertes concentraciones de sales.

- *Saturadas:* son soluciones químicas en las cuales contienen la máxima cantidad de soluto con relación a la cantidad de solvente, presentan un estado de equilibrio dinámico.

  Ejemplos de este tipo de soluciones:

  – Coca Cola es una solución saturada de dióxido de carbono en agua.
  – El suelo se encuentra saturado por nitrógeno.
  – Al colocar sal al vinagre hasta que se sature.

2.2.2 Concentración de una solución

La concentración de una solución es la relación existente entre la cantidad de soluto y la cantidad de solvente, tomemos en cuenta que a mayor cantidad de soluto mayor es la cantidad de la concentración; de igual forma a menor cantidad de soluto es menor la cantidad de concentración.

Las concentraciones se clasifican en:

- Disolución insaturada
- Disolución saturada
- Disolución sobresaturada

Las unidades en las cuales las concentraciones pueden expresarse son:

- Porcentaje masa-masa
- Porcentaje volumen-volumen
- Porcentaje masa-volumen
- Molaridad
- Molalidad
- Formalidad
- Normalidad
- Fracción molar

Cálculo de la molaridad: determinar la molaridad del alcohol etílico cuya fórmula química es C2H6O, que tiene una masa de 82.5 gramos y un volumen de 0.45 litros.

- *Se calcula el peso molecular:*

Carbono	C = 2 x 12 = 24
Hidrógeno	H = 6 x 1 = 6
Oxígeno	O = 1 x 16 = 16
Peso molecular =	46 gr / mol

- *Fórmula para calcular la molaridad:*

$$M = \frac{masa}{peso\ molecular * volumen}$$

$$M = \frac{82.5\ gramos}{46 \frac{gr}{mol} * 0.45\ litros}$$

M = 3.98 Moles

2.2.3 Equilibrio químico

El equilibrio químico es el estado que se produce en una disolución en la que la actividad química de los reactivos o de las concentraciones de los mismos permanecen sin ningún cambio en un tiempo determinado.

Se pueden distinguir dos tipos de equilibrio químico:

- *Equilibrio homogéneo:* son los sistemas en los cuales tanto los reactantes como los productos se encuentran en la misma fase, es decir, en el mismo estado físico.
- *Equilibrio heterogéneo:* son sistemas en los cuales tanto los reactantes como los productos se encuentran en más de una fase, es decir, en más de un estado físico.

2.2.4 La constante de equilibrio

Las investigaciones científicas relacionadas con la constante de equilibrio se debe a los estudios realizados por Cato Maximilian Guldberg, matemático y químico noruego, que junto a Peter Waage, profesor de la Universidad de Oslo en 1864, lograron encontrar una forma experimental para determinar la constante de equilibrio.

Esta constante de equilibrio relacionaba la concentración de los reactivos y productos en el equilibrio con la magnitud.

Consideremos un equilibrio de la forma:

$$mM + nN \rightleftharpoons pP + qQ$$

La constante de equilibrio se presenta de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Kc = \frac{P^{p}\ x\ Q^{q}}{M^{m}\ x\ N^{n}}$$

Además, es necesario considerar los siguientes valores característicos de la constante de equilibrio: si su valor es muy grande significa que la reacción directa va en continuo progreso hasta que uno de los reactivos se agota, si su valor es igual a 1 representa que los dos reactivos y sus productos son similares y si su valor es muy pequeño significa que apenas se ha formado una pequeña cantidad de producto

2.2.5 Coeficiente de actividad

Es un número que expresa la actividad de una sustancia desde el punto de vista químico, y la actividad puede definirse como la concentración efectiva de una especie. Obsérvese que este factor de actividad es un número adimensional que utiliza la fracción molar

para su determinación, y depende de la temperatura, presión y composición de la sustancia.

Si nos referimos a una disolución en química acuática, el soluto es la sustancia que se disuelve en una sustancia conocida como disolvente, el coeficiente de actividad se puede expresar como medida de cuánto la solución difiere de la disolución. Como complemento de esta definición se entiende por “mol” como la unidad que mide la cantidad de sustancia que contiene tantas entidades elementales del tipo considerado, 1 mol equivale a 6,02214129 (30) x 10^{23} unidades elementales.

Para entender esta definición podemos indicar que en un mol de agua H2O existen 2 x 6,02214129 (30) x 10^{23} átomos de hidrógeno y 1 x 6,02214129 (30) x 10^{23} átomos de oxígeno.

2.2.6 El pH del agua

El pH en el agua se define como la alcalinidad o la acidez, es decir, la concentración de iones de hidrógeno que posee el agua que se considera apta para el consumo humano.

Una de las metodologías para determinar la calidad del agua potable es medir su nivel del pH. Cuando el valor del pH es igual de 7,0 se considera que la solución en estado neutro, las soluciones con valores de pH menores a 7,0 se consideran como ácidas, las soluciones con valores de pH mayores a 7,0 y hasta 14 se consideran como básicas.

Tomar en cuenta que la escala del pH es logarítmica, es decir, si una muestra de agua posee un pH igual a 6 representa que es diez veces más ácida que una muestra de agua con pH igual a 7; si una muestra de agua tiene un pH igual a 5 representa que es cien veces más ácida que una muestra de agua con pH igual a 7.

Se considera un valor normal del pH del agua apta para el consumo humano entre 6,5 a 8,5 medidas a 25 grados centígrados.

Cuando el agua apta para el consumo humano presenta valores de pH menores a 6,5 se generan los siguientes problemas:

- El agua se caracteriza por ser corrosiva.
- El agua disuelve iones metálicos como hierro, magnesio y cobre.
- El agua presenta un sabor amargo.
- El agua presenta un color azul verdoso.

Cuando el agua apta para el consumo humano presenta valor de pH mayores a 8,5 se generan los siguientes problemas:

- Presenta incrustaciones en el interior de la tubería de hierro galvanizado.
- Disminuye la cantidad de agua en las tuberías de distribución por la disminución de la sección transversal de las mismas.
- Se dificulta la generación de espuma al momento del lavado de la vajilla.
- Disminuye la eficiencia de los calentadores de agua a nivel doméstico.

La eficiencia de desinfección del cloro se encuentra en función el pH del agua como se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 1
Influencia del pH del agua en la eficiencia del cloro

pH del agua	Eficiencia del cloro	Medio
4,0	100 %	Ácido
4,5	100 %	Ácido
5,0	100 %	Ácido
5,5	99 %	Ácido
6,0	97 %	Ácido

6,5	95 %	Ácido
7,0	92 %	Neutro
7,5	85 %	Base
8,0	18 %	Base
8,5	6 %	Base

Elaboración: Miguel Araque.

2.2.7 El pOH del agua

Los estudios relacionados con el pOH del agua fueron realizados en 1909 por el científico inglés Soren Sorenser, el descubrimiento de este parámetro del agua se realizó de forma accidental y originalmente tenía el nombre en latín *Pondus Hydrogenni.*

Desde el punto de vista de la química acuática, el pOH es la medida de alcalinidad o acidez de una disolución. Otra definición del pOH es el logaritmo negativol de base 10 de la actividad que tienen los iones hidroxilos.

Se presenta la fórmula usada para definir el pOH:

$$pOH = - \log [OH^-]$$

$$pH = - \log [H +]$$

Entonces se presenta el producto iónico del agua.

2.2.8 Teoría de Arrhenius

$$- \log [OH^-] \ - \log [H_3O^-] = - \log 10 \wedge - 14$$

$$pOH + pH = 14$$

Svante Arrehenius nació en la ciudad de Vik perteneciente al condado de Sogn og Fjordane, Noruega, el 19 de febrero de 1859, su contribución científica le llevó a ser reconocido con el Premio Nobel

de Química en 1903. Su investigación científica fue sobre las propiedades conductoras de las disoluciones electrolíticas, a partir de las cuales formuló su tesis doctoral.

Su ley se describe como la formación de agua a partir de iones hidrógeno e hidroxilo, así como la formación de los iones hidrógeno e hidroxilo procedentes de la disociación de un ácido y una base. Se podría presentar la siguiente acusación:

$$\text{Ácido}+ \; + \; \text{base}- \rightleftharpoons \text{sal} \; + \; \text{agua}$$

Un ejemplo clásico de esta teoría se refiere a que dos moles de hidróxido de sodio pueden combinarse con un mol de ácido sulfúrico y se obtienen dos moles de agua con un mol de sulfato de sodio:

$$2\,NaOH + H_2SO_4 \rightarrow 2\,H_2O + Na_2SO_4$$

2.2.9 Teoría de Bronsted Lowry

Johannes Bronsted y Martin Lowry fueron dos científicos, el primero danés y el segundo británico, autores de la teoría de las reacciones ácidos base, concretamente esta teoría indica que cuando reacciona un ácido con una base, el ácido forma una base conjugada y la base forma un ácido conjugado mediante el intercambio protónico.

Veamos un ejemplo en la siguiente reacción:

$$CH_3COOH + H_2O \rightleftharpoons CH_3COO^- + H_3O+$$

El ácido acético CH3COOH dona un protón al agua y se convierte en base conjugada que en nuestro caso es el acetato, mientras que el agua, que es la base, acepta el protón del CH3COOH y se convierte en ácido conjugado, es decir, el hidronio de iones H_3O+.

2.2.10 *Ácidos monopróticos*

Los ácidos monopróticos se caracterizan por ceder un solo protón a un átomo de hidrógeno a la solución acuosa para formar nuevos compuestos. La siguiente tabla muestra ejemplos de este tipo de ácidos.

Tabla 2
Ejemplos de ácidos monopróticos

Ácido monopróticos	**Fórmula**	**Tipo de ácido**
Ácido perclórico	$HClO_4$	Muy fuerte
Ácido clorhídrico	HCl	Fuerte
Ácido nítrico	HNO_3	Fuerte
Ácido fluorhídrico	HF	Débil
Ácido fórmico	$HCOOH$	Débil
Ácido láctico	$C_3H_5O_4H$	Débil
Ácido benzoico	C_6O_5COOH	Débil
Ácido hipocloroso	$HClO$	Débil
Ácido cianhídrico	HCN	Débil
Fenol	C_6O_5H	Débil

Elaboración: Miguel Araque.

2.2.11 *Ácidos dipróticos*

Son ácidos que se caracterizan por ceder dos protones o átomos de hidrógeno por cada molécula de sustancia acuosa, el comportamiento del ácido sulfúrico es un buen ejemplo de este tipo de ácidos como se presenta a continuación:

– Primera etapa: $H_2SO_4 \rightarrow H^+ + HSO_4^-$
– Segunda etapa: $HSO_4 \rightarrow H^+ + SO_4^{--}$

Ejemplos de ácidos dipróticos:

Ácido sulfúrico	H_2SO_4
Ácido sulfhídrico	H_2S
Ácido carbónico	H_2CO_3
Ácido crómico	H2Cro4

2.2.12 *Ácidos fuertes*

Los ácidos fuertes se caracterizan porque se disocian completamente cuando se disuelven en agua, es decir, ceden a la solución una cantidad importante de iones H+. Se presentan los siguientes ejemplos:

Ácido perclórico	$HClO_4$
Ácido sulfúrico	H_2SO_4
Ácido yodhídrico	HI
Ácido bromhídrico	HBr
Ácido clorhídrico	HCl
Ácido nítrico	HNO_3

2.2.13 *Ácidos débiles*

Los ácidos débiles se caracterizan porque no se disocian completamente cuando se disuelven en agua, es decir, ceden a la solución una cantidad pequeña de iones H+.

2.2.14 *Bases fuertes*

Las bases fuertes se caracterizan porque se disocian completamente cuando se disuelven en agua, es decir, ceden a la solución una cantidad importante de iones OH^-. Se presentan los siguientes ejemplos:

Hidróxido de litio	LiOH
Hidróxido de sodio	NaOH
Hidróxido de potasio	KOH
Hidróxido de calcio	$Ca(OH)_2$

Hidróxido de rubidio	$RbOH$
Hidróxido de cesio	$CsOH$
Hidóxido de estroncio	$SrOH$
Hidróxido de bario	$Ba(OH)_2$

2.2.15 Bases débiles

Las bases débiles se caracterizan porque no se disocian completamente cuando se disuelven en agua, es decir, ceden a la solución una cantidad pequeña de iones OH^-. Se presentan los siguientes ejemplos:

Amoníaco	NH_3
Anilina	$C_6H_5NH_2$
Metilasmina	CH_3NH_2
Piridina	C_5H_5N
Hidracina	NH_2NH_2
Hidroxilamina	NH_2OH

2.2.16 Las ecuaciones de balances de masas

Partiendo del principio que la masa no se crea ni se destruye, el balance de masas se define como la contabilidad de entradas y salidas que se tiene en un proceso químico como la química del agua.

Las ecuaciones de balance de masas pueden aplicarse ya sea en sistemas abiertos o cerrados. El sistema abierto es aquel en que existe transferencia de masa a través de los límites del mismo y el sistema cerrado difiere en que ninguna masa entra o sale de los límites del sistema.

2.2.17 Contaminantes primarios del agua

El concepto de contaminante es toda sustancia, compuesto químico o sustancia biológica que altera las condiciones o deteriora la calidad del medioambiente, que puede ser al agua, el aire o la vida en general.

Los contaminantes primarios son emitidos directamente al ambiente, por lo que se consideran de mayor incidencia y peligrosidad, entre los principales podemos señalar los siguientes:

- *Monóxido de carbono:* es un contaminante producido por la combustión de combustibles fósiles de los vehículos; en la actualidad, se está tratando de mitigar su impacto ambiental mediante la producción de combustibles como el bioetanol. El monóxido de carbono se descubrió gracias a las investigaciones del químico francés De Lassone que, en uno de sus experimentos, calentó óxido de zinc con coque. Un aspecto muy curioso de este compuesto fue que se utilizó como combustible cuando la gasolina escaseaba.
- *Óxido de azufre:* son productos sulfatados que provienen del trabajo de las industrias, se caracterizan por ser altamente tóxicos especialmente si estos desechos llegan a cuerpos de agua superficiales como lagos, lagunas o mares. Otra consecuencia de los productos sulfatados cuando llegan a los cuerpos de agua sin tratamiento es la alteración en el conteo de nutrientes de ciertos microorganismos. Una característica de este compuesto es que es altamente irritante y las personas pueden presentar náuseas, mareos y abundantes vómitos, por lo que se debe tener precaución y cuidado al manipular este compuesto.
- *Desechos radioactivos:* estos productos provienen generalmente de las centrales nucleares, que en la actualidad y luego de la catástrofe de Chernóbil, muchas de ellas han sido sustituidas por energías renovables, son altamente tóxicos como el plutonio, que es el resultado de la fusión del uranio. Es importante considerar la clasificación de estos desechos radioactivos en:

  – Residuos de muy baja actividad (vida corta y media).
  – Residuos de muy baja actividad (vida larga).
  – Residuos de baja y media actividad (vida corta y media).

– Residuos de baja y media actividad (vida larga).
– Residuos de alta actividad.

- *Plomo:* proviene de la combustión de los automóviles, es el principal contaminante primario tanto del agua como de la atmósfera. El compuesto químico más perjudicial para el hombre es el hidróxido de plomo, que afecta al aparato respiratorio y al digestivo. En las plantas, su consecuencia es que limita su síntesis clorofílica y puede formar parte de la cadena alimentaria. Es importante presentar la producción mundial de plomo con corte en 2019 antes de la pandemia.

  – China: 2000 toneladas.
  – Australia: 509 toneladas.
  – Perú: 308 toneladas.
  – Estados Unidos: 274 toneladas.
  – México: 259 toneladas.
  – Rusia: 230 toneladas.
  – India: 200 toneladas.
  – Bolivia: 88 toneladas.
  – Turquía: 71 toneladas.
  – Suecia: 69 toneladas.

- *Clorofluorocarbonos:* estos compuestos químicos que provienen de aerosoles y sistemas de refrigeración disminuyen generalmente el espesor de la capa de ozono y la consecuencia que produce en el calentamiento global. Es un compuesto químico que contiene átomos de carbono, cloro y flúor y puede prolongar su vida activa durante 100 años.

2.2.18 Contaminantes secundarios del agua

Los contaminantes secundarios son aquellos que se generan por las reacciones químicas de los contaminantes primarios, entre los principales podemos indicar los siguientes:

- Ácido sulfúrico: proviene del proceso industrial de algunas fábricas y se mezcla con el vapor de agua de la atmósfera permitiendo la formación de ácido sulfúrico y este fenómeno se conoce como lluvia ácida. Las consecuencias de la lluvia ácida son: la acidificación de las fuentes de agua superficiales como ríos, lagos, lagunas y océanos, incidencia en el normal crecimiento de la vida acuática, y en cuanto a la salud humana, el incremento de las afecciones respiratorias como el asma, la bronquitis crónica y el síndrome de Krupp.
- *Ozono:* se genera por la fotosíntesis de los óxidos de nitrógeno provenientes del funcionamiento de calefones y de otros sistemas de calentamiento urbano; cuando el ozono entra en contacto con la luz ultravioleta, provoca la formación de radicales libres, que es el origen del smog fotoquímico.
- *Metano:* la formación del metano se debe principalmente a la descomposición de la materia orgánica, especialmente en botaderos de basura que al mezclarse con el agua residual originan unos vertidos muy peligrosos denominados lixiviados; estos son los principales contaminantes de las aguas subterráneas.
- *Contaminación biológica:* la contaminación biológica de las aguas superficiales se debe principalmente por la presencia de herbicidas y pesticidas muy utilizados en las labores agrícolas en regiones donde aún no se producen alimentos libres de químicos.
- *Peroxiacetilnitrato:* tienen su origen en las fábricas de pinturas y sus derivados, y se caracterizan por ser un compuesto altamente urticante cuando se expone durante largos periodos de tiempo, afectando especialmente a ojos, pulmones y aparto respiratorio. Cuando entra en contacto con las aguas superficiales, se produce una contaminación inmediata.

Capítulo 3

Planta de tratamiento de agua potable

3.1 Introducción

Las aguas superficiales están influenciadas por factores naturales y antropogénicos; entre los principales factores naturales podemos mencionar las temporadas de lluvia, las temporadas de sequía prolongada, las características del suelo por el que fluye el agua; entre los principales factores antrópicos tenemos descargas de aguas residuales domésticas, descargas de aguas residuales industriales, descargas de aguas residuales de laboratorios químicos, derrames petroleros, basura y fumigaciones aéreas.

Las plantas de tratamiento de agua potable pueden considerarse como una de las industrias más importantes para la subsistencia de la vida en nuestro planeta, ya que reciben materia prima como el agua cruda con características físico químicas variables y entregan agua potable apta para el consumo humano que cumpla todos los estándares técnicos de calidad.

Además, las plantas de tratamiento de agua potable cumplen un rol fundamental en la salud del ser humano, ya que un líquido vital de alta calidad previene el aparecimiento de las enfermedades transmitidas por el agua, muchas de las cuales son mortales.

Finalmente, la Organización de las Naciones Unidas, a través de sus organismos filiales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS) han establecido estándares de calidad para las plantas de tratamiento de agua potable.

3.2 Objetivos del tratamiento del agua cruda

A continuación, se presentan los principales objetivos del diseño y construcción de una planta de tratamiento de agua potable:

- *Higiénico:* lograr la remoción de elementos peligrosos y nocivos para la salud humana, entre los cuales podemos mencionar compuestos orgánicos, protozoarios y microorganismos.
- *Estético:* lograr la corrección de los elementos estéticos del agua superficial y subterránea, como el color, la turbidez, el olor y el sabor.
- *Económico:* lograr la reducción de parámetros como, por ejemplo, la dureza del agua, la concentración de hierro, la concentración de manganeso, utilizando métodos técnicos que además de ser efectivos, tengan en cuenta el aspecto económico tanto en la construcción como en el mantenimiento de la planta de tratamiento.

3.3 Procesos de tratamiento en las plantas de agua

Las plantas de tratamiento de agua potable deben tener las siguientes unidades de tratamiento:

- Aireación
- Coagulación
- Floculación
- Sedimentación
- Filtración
- Corrección de dureza

- Desinfección
- Cloración
- Tanques de almacenamiento

3.4 Unidad de aireación

3.4.1 Objetivos de la unidad

Entre los objetivos de esta unidad de tratamiento está la remoción de gases de la masa de agua a tratar, entre los principales podríamos indicar:

- *Remoción de gas carbónico:* el gas carbónico se produce de forma natural en la naturaleza, su fórmula química es CO2, su masa molecular es 44,01 gr/mol y su densidad alcanza los 0,0001976 gr/cm³.
- *Remoción de gas sulfhídrico:* está presente en el agua debido a la putrefacción de los depósitos orgánicos, su fórmula química es H2S, su masa molecular es 34,10 gr/mol y su punto de inflamabilidad se da a los 190 grados Kelvin.
- *Remoción de cloro en exceso:* es un elemento muy utilizado en la desinfección del agua, fue descubierto en 1774 por el sueco Carl Wihelm Scheele en forma diatómica aunque creía que estaba compuesto de oxígeno. Su nombre se debe a los estudios realizados en 1810 por Humphy Davi. El ácido hipocloroso es el más utilizado en las plantas de tratamiento de agua potable.
- Remoción de sustancias oleaginosas: estas sustancias son las causantes del mal sabor y olor del agua cruda.
- *Descomposición de la materia orgánica:* estas sustancias son las causantes del mal sabor y olor del agua cruda.

3.4.2 Tipos de aireadores

3.4.2.1 Aireadores de gravedad

Son los más utilizados en las plantas de tratamiento de agua potable y consisten en una serie de bandejas de acrílico perforadas cuyo propósito en la disgregación de la masa de agua en pequeñas gotas que pasan por estos orificios. Para aumentar la eficacia de esta unidad, se colocan en las bandejas trozos de carbón o bolas de cerámica para inducir una mayor turbulencia.

3.4.2.2 Aireadores de aire difuso

Este tipo de aireadores se caracterizan por tener una serie de tuberías perforadas en el fondo de la unidad a través de las cuales se inyecta aire comprimido en el sistema. Como resultado de esta operación, se producen burbujas de aire desde el fondo de la unidad, incrementando el contacto entre el agua y el aire.

3.4.2.3 Aireadores de aspersión

Este tipo de aireadores se utiliza en proyectos en los que las plantas de tratamiento se localizan dentro del perímetro urbano, es decir, como están compuestas de boquillas que permiten la expulsión de la masa de agua al ambiente donde el aire entra en el agua. Son los más eficientes en términos de intercambio de gases.

3.5 Unidad de coagulación

3.5.1 Introducción

El objetivo de esta unidad es la remoción de partículas en suspensión de tamaño coloidal que todavía se encuentran en la masa de agua en proceso de tratamiento, estas partículas se pueden encontrar en:

- Suspensión
- Disueltas
- Suspensiones concentradas
- Suspensiones finas
- Coloides

3.5.2 Sustancias químicas

3.5.2.1 Coagulantes

Los más utilizados son los compuestos de aluminio cuya característica es que inducen a la formación de hidróxidos gelatinosos no solubles que absorben las impurezas y decantan al fondo de la unidad.

3.5.2.2 Alcalinizantes

Son sustancias químicas que pueden inducir la necesaria alcalinidad a la masa de agua necesaria para la coagulación de las partículas, los más comunes son:

- Óxido de calcio
- Hidróxido de calcio
- Hidróxido de sodio
- Carbonato de sodio

3.5.3 Factores que influyen en el proceso de coagulación

Los factores que influyen efectivamente en el proceso de coagulación de las partículas en el agua son los siguientes:

- Tipo de coagulante:
  - De aluminio: peso específico 2700 kg/m^3, el punto de fusión es 600 grados centígrados y su peso atómico es 26,9815.

- De hierro: peso específico 7874 kg/m^3, el punto de fusión es 1535 grados centígrados y su peso atómico es 55,847.

• Cantidad de coagulante: la cantidad de coagulante está en función de las características físicas químicas del agua a tratar y son las siguientes:
  - La turbidez
  - El color
  - La concentración bacteriológica

• Concentración, color y turbidez
  - Mayor cantidad de coloides
  - Menor cantidad de coloides
  - Mayor cantidad de partículas en suspensión
  - Menor cantidad de partículas en suspensión
  - Sustancias coloidales disueltas

• Características químicas del agua en proceso de tratamiento
  - La materia orgánica del agua
  - La concentración de hierro
  - La alcalinidad natural

• Concentración de iones hidrógeno en el agua
  - En el laboratorio de aguas mediante la prueba de jarras se debe concentrar el valor óptimo del pH.

• Tiempo de retención en las unidades de mezcla
  - Cuando se utiliza el canal Parshall en la planta de tratamiento de agua potable para conseguir la mezcla de los coagulantes, la mezcla será instantánea en la masa del líquido.
  - Mientras que, si se utiliza unidades de mezcla lenta será indispensable esperar que se formen los flóculos, luego que se produzca la formación del material gelatinoso y finalmente que se formen los flóculos.

- Temperatura:
  - El proceso de coagulación se produce de forma óptima cuando la temperatura es elevada.

- Agitación:
  - Si hay una baja velocidad de agitación en esta unidad de tratamiento, el proceso de formación de flóculos se reduce considerablemente.

3.5.4 Coagulantes de aluminio

El sulfato de aluminio es el más utilizado en las plantas de tratamiento de agua potable, su fórmula química es Al2 (SO4)3 18H2O. Se puede encontrar en el mercado en tres presentaciones: blanco, también conocido como libre de hierro; amarillo, que es el más común y económico; y negro, que es una mezcla de sulfato de aluminio.

3.5.5 Dosificadores

Una vez que en la operación de las plantas de tratamiento se ha preparado la solución del coagulante, es indispensable preparar los dosificadores que pueden ser de concreto, asbesto, cemento o fibra de vidrio y todos ellos protegidos con pintura antiácida.

Los tanques de estos dosificadores poseen un mecanismo manual o mecánico para lograr la homogenización de la solución. La solución debe prepararse con una concentración del 1 al 2 % y los dosificadores se clasifican de la siguiente manera:

- Tanque a nivel constante con orificio no regulable.
- Tanque a nivel constante con orificio regulable.
- Tanque a nivel constante con orificio regulable y mecanismo para retornar los excedentes.
- Bomba de diafragma regulable.

3.5.6 Cámaras de mezcla

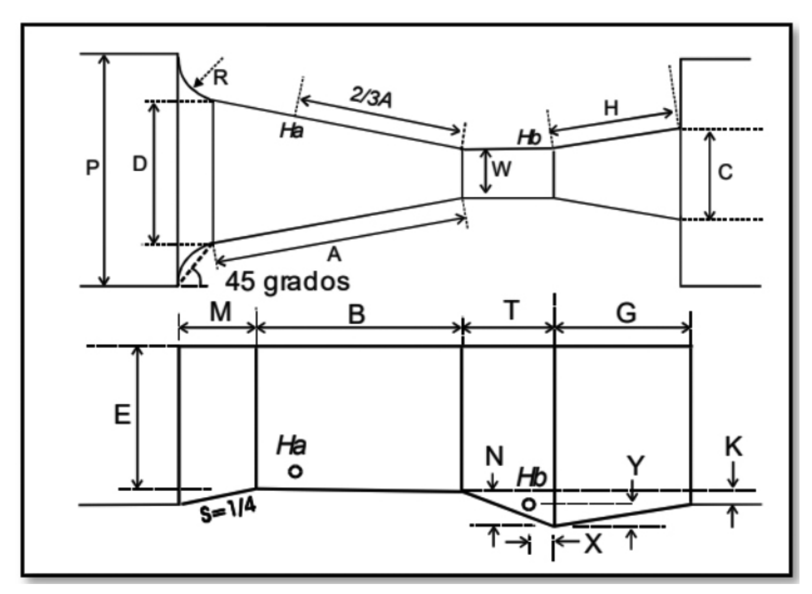
3.5.6.1 Cámaras de mezcla rápida

Una vez que el coagulante de aluminio ha sido agregado en la masa de agua es indispensable que la mezcla se produzca en el menor tiempo posible para lo cual se puede inducir a formar un flujo turbulento con lo cual se originan resaltos hidráulicos, cámaras con deflectores y mezcladores mecánicos.

Los tipos más comunes de estas cámaras de mezcla son los siguientes:

- Cámaras con deflectores.
- Canaleta Parshall.

Figura 1
Dimensiones del Canal Parshall



Nota. https://bit.ly/3H3HKyd

Tabla 3

Dimensiones del Canal Parshall

W (cm)	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	F (cm)	G (cm)	K (cm)	N (cm)	R (cm)	M (cm)	P (cm)	X (cm)	Y (cm)
2,5	36,3	35,6	9,3	16,8	22,9	7,6	20,3	1,9	2,9	-	-	50,0	0,8	1,3
5,1	41,4	40,6	13,5	21,4	35,6	11,4	25,4	2,2	4,3	-	-	70,0	1,6	2,5
7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	38,1	15,2	30,5	2,5	5,7	40,6	30,5	76,8	2,5	3,8
15,2	62,1	61,0	39,4	40,3	45,7	30,5	61,0	7,6	11,4	40.6	30,5	90,2	5,1	7,6
22,9	88,0	86,4	38,0	57,5	61,0	30,5	45,7	7,6	11,4	40,6	30,5	108,0	5,1	7,6
30,5	137,2	134,4	61,0	84,5	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	149,2	5,1	7,6
45,7	144,9	142,0	76,2	102,6	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	167,6	5,1	7,6
61,0	152,5	149,6	91,5	120,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	185,4	5,1	7,6
91,5	167,7	164,5	122,0	157,2	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	222,3	5,1	7,6
122,0	183,0	179,5	152,5	193,8	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	271,1	5,1	7,6
152,5	198,3	194,1	183,0	230,3	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	308,0	5,1	7,6
182,8	213,5	209,0	213,5	266,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	344,2	5,1	7,6
213,5	228,8	224,0	244,0	303,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	381,0	5,1	7,6
244,0	244,0	239,2	274,5	340,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	417,2	5,1	7,6
305,0	274,5	427,0	366,0	475,9	122,0	91,5	183,0	15,3	34,3	-	-	-	30,5	22,9

Nota. https://bit.ly/3p3ssU8

Tabla 4
Ecuación de gasto del Canal Parshall

Ancho de la garganta W [m]	**Ecuación de gasto [m^3/segundo]**
0,3048	Q=0,6909*Ha^1,520
0,4572	Q=1,0560*Ha^1,538
0,6096	Q=1,4280*Ha^1,550
0,9144	Q=2,1840*Ha^1,566
1,2192	Q=2,9530*Ha^1,578
1,5240	Q=3,7320*Ha^1,587
1,8288	Q=4,5190*Ha^1,595
2,1336	Q=5,3120*Ha^1,601
3,0480	Q=6,1120*Ha^1,607
3,6580	Q=7,4630*Ha^1,600
4,5720	Q=8,8590*Ha^1,600
6,0960	Q=10,960*Ha^1,600
7,6200	Q=14,450*Ha^1,600
9,1440	Q=17,940*Ha^1,600
12,1920	Q=21,440*Ha^1,600

Elaboración: Miguel Araque.

3.5.6.2 Cámaras de mezcla lenta

A diferencia de la mezcla rápida, las cámaras de mezcla lenta se caracterizan por una agitación moderada para garantizar la buena formación de los floculós y la posterior decantación.

Existen los siguientes tipos:

- Floculadores mecánicos.
- Floculadores hidráulicos.
- Cámaras de deflexión.
- Cámaras tipo Alabama.

3.5.6.3 Diseño del vertedero hidráulico (Mezcla rápida)

Para el dimensionamiento del vertedero hidráulico es indispensable cumplir con condiciones donde la altura del vertedero debe ser mayor o igual al doble de la altura de la lámina de agua.

Datos

$$Q_{total} = 26\frac{l}{s} = 0.026\ \frac{m^3}{s}$$
$$B = 0.80\ m\ ;\ \text{ancho del canal}$$
$$P = 0.60\ m\ ;\ \text{altura del vertedero}$$
$$g = 9.81\ \frac{m}{s^2}\ ;\ \text{gravedad}$$
$$\delta_{T°=10°c} = 9803\ \frac{Kg * m}{m^3 * s^2};\ \text{peso específico del agua}$$
$$\mu_{T°=11°c} = 0.001271\ \frac{N.s}{m^2};\ \text{viscosidad dinámica del agua a 11°C}$$

Altura de la lámina de agua (H): tomemos en cuenta que el vertedero es rectangular de pared delgada, además debemos considerar que lateralmente el vertedero se extenderá una dimensión igual a 3H. También hay que considerar la facilidad de construcción de este tipo de unidad de medida.

$$Q = 1.84 * B * H^{1.5}$$

$$H = \left(\frac{Q}{1.84 * B}\right)^{\frac{1}{1.5}}$$

$$H = \left(\frac{0.026\ \frac{m^3}{s}}{1.84 * 0.80\ m}\right)^{\frac{1}{1.5}}$$

$$H = 0.068\ m$$

Condición para considerar:

$$P \geq 2H$$
$$0.60 \geq 2(0.068)$$
$$0.60\ m \geq 0.136\ m$$

Cálculo del caudal unitario (q): el caudal unitario en un vertedero se define como la cantidad de agua que pasa por el mismo por unidad de ancho, este parámetro nos permitirá calcular la altura crítica en el canal de aproximación. Recordemos que la altura crítica es la frontera entre el flujo subcrítico y el flujo supercrítico.

$$q = \frac{Q}{B}$$

$$q = \frac{0.026\ \frac{m^3}{s}}{0.80\ m}$$

$$q = 0.0325\ \frac{m^2}{s}$$

Altura crítica (h_c): en el diseño de canales de flujo libre, la altura crítica se define como la altura que constituye el límite entre el flujo supercrítico (flujo altamente erosivo) y el flujo subcrítico recomendado para su diseño. Además, una forma práctica de encontrar el tipo de flujo es calcular el número de Froude, que es un número adimensional y si es igual a 1 el flujo es crítico.

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{\left(0.0325\ \frac{m^2}{s}\right)^2}{9.81\ \frac{m}{s^2}}}$$

$$h_c = 0.0475\ m$$

Condición para considerar:

$$\frac{P}{h_c} > 3$$

$$12.63 > 3$$

Profundidad después del vertedero (h_1): con la fórmula que se presenta a continuación se determina la profundidad del calado contraído que a su vez es el inicio del resalto hidráulico que se utiliza para mezclar el coagulante en el agua que se va a tratar.

$$h_1 = \frac{\sqrt{2} * h_c}{1.06 + \left(\frac{P}{h_c} + 1.5\right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$h_1 = \frac{\sqrt{2} * 0.0475\ m}{1.06 + \sqrt{(12.63 + 1.5)}}$$

$$h_1 = \frac{0.06717\ m}{4.8189}$$

$$h_1 = 0.0126\ m$$

Velocidad al inicio del resalto: se calcula la velocidad al inicio del resalto hidráulico para determinar el número de Froude en esta sección de la estructura hidráulica.

$$v_1 = \frac{q}{h_1}$$

$$v_1 = \frac{0.0325\ \frac{m^2}{s}}{0.0126\ m}$$

$$v_1 = 2.579\ \frac{m}{s}$$

Número de Froude: es un parámetro hidráulico adimensional que nos permite identificar si el resalto hidráulico que se forma es estable para lo cual su valor debe estar comprendido entre 4,5 a 9,0.

$$Fr = \frac{V_1}{\sqrt{g * h_1}}$$

$$Fr = \frac{2.579\ \frac{m}{s}}{\sqrt{9.81\ \frac{m}{s^2} * 0.0126\ m}}$$

$$Fr = 7.33$$

Altura después del resalto: la altura de agua después del resalto hidráulico se calcula con la fórmula propuesta por el Bureau of Reclamation perteneciente al Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos.

$$h_2 = \frac{h_1}{2}\left(\sqrt{(1 + 8Fr^2)} - 1\right)$$

$$h_2 = \frac{0.0126}{2}\left(\sqrt{(1 + 8(7.33)^2)} - 1\right)$$

$$h_2 = 0.124\ \text{m}$$

Velocidad al final del resalto: este parámetro hidráulico es necesario obtener con la finalidad de conseguir la velocidad media en el resalto hidráulico, que luego será utilizada para calcular el tiempo de mezcla, que por norma debe ser menor a 1 segundo.

$$v_2 = \frac{q}{h_2}$$

$$v_2 = \frac{0.0325\ \frac{m^2}{s}}{0.124\ m}$$

$$v_2 = 0.262\ \frac{m}{s}$$

Cálculo de la velocidad media: se calcula este parámetro considerando la velocidad existente al ingreso del resalto hidráulico como a la salida del mismo.

$$v_{\mathbf{m}} = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$$v_{\mathbf{m}} = \frac{2.579\ \frac{m}{s} + 0.262\ \frac{m}{s}}{2}$$

$$v_{\mathbf{m}} = 1.42\ \frac{m}{s}$$

Longitud del resalto hidráulico: la longitud del resalto hidráulico se calculará con las fórmulas propuestas por varios autores.

País: República Checa
Autor: Smetana

$$L = 6\,(h_2 - h_1)$$

$$L = 6\,(0.124\text{ m} - 0.0126\text{ m})$$

$$L = 0.66\,m$$

País: Alemania
Autor: Safranez

$$L = 5.9\,(h_2 - h_1)$$

$$L = 5.9\,(0.124\text{ m} - 0.0126\text{ m})$$

$$L = 0.65\text{ m}$$

País: Estados Unidos de América
Autor: Bureau of Reclamation

$$L = 6.9\,(h_2 - h_1)$$
$$L = 6.9\,(0.124\text{ m} - 0.0126\text{ m})$$

$$L = 0.76\text{ m}$$

Energía disipada en el resalto: representa la energía que se disipa en el resalto hidráulico que luego será utilizada para determinar el gradiente hidráulico para verificar que la turbulencia es suficiente para garantizar la mezcla del coagulante.

$$h_p = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 * (h_2 * h_1)}$$

$$h_p = \frac{(0.124\text{ m} - 0.0126\text{ m})^3}{4 * (0.124\text{ m} * 0.0126\text{ m})}$$

$$h_p = 0.22\text{ m}$$

Cálculo del tiempo de mezcla: como ya se ha expresado en los párrafos anteriores, su valor debe ser menor a 1 segundo, el tiempo de mezcla del coagulante.

$$t = \frac{L}{v_m}$$

$$t = \frac{0.76\ m}{1.42\ \frac{m}{s}}$$

$$t = 0.53\ s$$

Gradiente hidráulico: es un parámetro cuya finalidad es comprobar la turbulencia que existe en el resalto hidráulico de la estructura.

$$G = \sqrt{\frac{\delta * h_p}{\mu * t}}$$

$$G = \sqrt{\frac{9803\ \frac{Kg * m}{m^3 * s^2} * 0.22\ m}{0.001271\ \frac{Kg}{(m * s)} * 0.53s}}$$

$$G = 1789.28\ s^{-1}$$

La condición es que el G se encuentre entre 1000 y 2000 s^{-1}

Grada de salida: estructura indispensable para coadyuvar a la formación del resalto hidráulico.

$$\frac{h_2}{6} = \frac{0.124\ m}{6} = 0.02\ m$$

Cálculo de la longitud de la caída del chorro: se considera la longitud máxima que cae en chorro en la estructura aguas abajo.

$$Lm = 1.45 * P^{0.54} * h_c^{0.46}$$

$$Lm = 1.45 * (0.60\ m)^{0.54} * (0.0475\ m)^{0.46}$$

$$Lm = 0.27\ m$$

3.6 Unidad de floculación

El objetivo principal de la unidad de floculación es permitir que el agua que contiene sulfato de aluminio o un químico similar incida en el crecimiento de los flóculos hasta que por la gravedad haga que se depositen en el fondo de la unidad. Entre los floculadores hidráulicos más utilizados se encuentran las unidades de pantallas de flujo horizontal y vertical.

3.6.1 Parámetros de diseño

A continuación, se presentan los parámetros de diseño para la unidad de floculación en una planta de tratamiento de agua potable:

- Los gradientes de velocidad óptimos en la unidad varían desde 20 segundos $^{-1}$ a 70 segundos $^{-1}$.
- Consideremos que el valor del gradiente de velocidad varía en forma uniforme en la unidad al ingreso en un valor mayor y va descendiendo progresivamente.
- En función de la temperatura del agua el tiempo de retención en la unidad varía entre 10 a 30 minutos.
- Cuando la planta de tratamiento del agua potable se encuentra localizada en una zona tropical el tiempo de retención recomendado es 15 minutos.
- En la unidad se recomienda el mayor número de canaletas.
- Es conveniente que no existan canales de conexión entre la unidad de mezcla rápida con la unidad de floculación.
- Para la construcción de las pantallas del floculador pueden ser construidas en concreto prefabricado, fibra de vidrio, acrílico, asbesto cemento u otro material de bajo costo.
- Las características del agua con las cuales se consigue resultados óptimos son los siguientes:

Índice de saturación de Langelier	≤ 10
Concentración de CO2	≤ 3,5 mg/litro
Concentración de sulfatos	≤ 1500 mg/litro
pH	≥ 6

3.6.2 Ejemplo de diseño

Datos

$Q_{total} = 26\frac{l}{s}$

$Q_{diseño} = 13\frac{l}{s} = 0{,}013\ \frac{m^3}{s}$; debido a que son dos unidades de floculadores

$T = 11{,}3\ °C$; temperatura del agua

$\delta_{T°=10°c} = 9803\frac{N}{m^3}$; peso específico del agua

$\mu_{T°=11°c} = 0.001271\frac{kg}{m * s}$; viscosidad dinámica del agua a 11°C

$t = 15\ min$; tiempo en la unidad

Se considera 3 secciones en serie (zonas)

$Velocidad\ de\ flujo = (0{,}10 - 0{,}35)\frac{m}{s}, segun: NTE\ INEN\ 2655: 2012$

PRIMERA SECCIÓN

Datos

$v = 0{,}30\frac{m}{s}$

$t = 5\ min$

Longitud de recorrido de agua en la primera sección: se refiere a la longitud total de canales que se tendrá en la primera sección de esta unidad, considerando que para el diseño se tendrá en cuenta tres secciones consecutivas.

$$L = velocidad\ de\ flujo * tiempo$$

$$L = 0{,}30\frac{m}{s} * \left(5\ min * \frac{60\ s}{1\ min}\right)$$

$$L = 90\ m$$

Volumen en la primera sección: debido a que son tres zonas en la unidad de floculación, el tiempo de cada sección es de 5 minutos.

$$V = caudal * tiempo$$

$$V = 0{,}014\frac{m^3}{s} * \left(5\ min * \frac{60\ s}{1\ min}\right)$$

$$V = 4{,}20\ m^3$$

Área transversal de un canal entre bafles: en este tipo de unidad de tratamiento se denomina bafles a los canales rectangulares por donde se desplaza el flujo.

$$A = \frac{\text{caudal}}{\text{velocidad}}$$

$$A = \frac{0{,}013\,\frac{m^3}{s}}{0{,}30\,\frac{m}{s}}$$

$$A = 0{,}0433\ m^2$$

Determinación del calado de agua en los canales: para lo cual se considera un ancho a= 0,20 m (asumido).

$$d = \frac{\text{área}}{\text{ancho}} = \frac{A}{a}$$

$$d = \frac{0{,}0433\ m^2}{0{,}20\ m}$$

$$d = 0{,}22\ m$$

Se considera un factor de seguridad fs= 1,10 (recomendado):

$$d_f = d * fs$$

$$d_f = 0{,}22\ m * 1{,}10$$

$$d_f = 0{,}25\ m$$

Espacio libre entre el tabique y la pared del tanque: con la finalidad de evitar la existencia de flujos turbulentos que podrían alterar el funcionamiento de la unidad de tratamiento.

$$e = 1{,}5 * \text{ancho}$$

$$e = 1{,}5 * 0{,}20\ m$$

$$e = 0{,}3\ m$$

Cálculo de la longitud efectiva útil del canal: para lo cual se considera que L_T= 14 m.

$$l = L_T - e$$

$$l = 14\ m - 0{,}30\ m$$

$$l = 13{,}70\ m$$

Determinación del número de canales.

$$\#_{canales} = \frac{L}{l}$$

$$\#_{canales} = \frac{90\ m}{13{,}70\ m}$$

$$\#_{canales} = 6{,}57 \approx 6$$

Ancho total de la cámara de floculación, considerando b= 0,03m (ancho de las paredes de acrílico):

$$B_1 = \#_{canales} * a + (\#_{canales} - 1) * b$$

$$B_1 = 6 * 0{,}20\ m + (6 - 1) * 0{,}03\ m$$

$$B_1 = 1{,}35\ m \approx 1{,}5\ m$$

Radio hidráulico de la canaleta:

$$Rh = \frac{\text{área}}{Pm} = \frac{A}{2d_f + a}$$

$$Rh = \frac{0{,}0466\ m^2}{2 * 0{,}25\ m + 0{,}20\ m}$$

$$Rh = 0{,}06657\ m$$

Pérdidas por fricción, considerando n= 0,012 s/m$^{1/3}$; coeficiente de rugosidad del canal (hormigón):

$$hf = \frac{(n * v)^2 * L}{Rh^{\frac{4}{3}}}$$

$$hf = \frac{(0{,}012\ \frac{s}{m^{1/3}} * 0{,}30\frac{m}{s})^2 * 90\ m}{(0{,}06657\ m)^{\frac{4}{3}}}$$

$$hf = 0{,}043\ m$$

Pérdidas localizadas, el valor de K puede ser de 2 a 4:

$$hf_1 = K * (\#_{canales} - 1) * \frac{v^2}{2g}$$

$$hf_1 = 2 * (6 - 1) * \frac{\left(0{,}30\frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9{,}8\ \frac{m}{s^2}}$$

$$hf_1 = 0{,}05\ m$$

Pérdidas totales:

$$hf_T = hf + hf_1$$

$$hf_T = 0{,}043\ m + 0{,}05\ m$$

$$hf_T = 0{,}10\ m$$

Gradiente de velocidad:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma * hf_T}{\mu * tiempo}}$$

$$G = \sqrt{\frac{9803\frac{N}{m^3} * 0{,}10\ m}{0.001271\frac{kg}{m * s} * 300s}}$$

$G = 60{,}7$; si cumple, gradiente obtenido en laboratorio ($60\ s^{-1}$)

SEGUNDA SECCIÓN

Datos

$v = 0{,}25\,\frac{m}{s}$
$t = 5\ min$

Longitud de recorrido de agua en la segunda sección:

$$L = velocidad * tiempo$$

$$L = 0{,}25\,\frac{m}{s} * \left(5\ min * \frac{60\ s}{1\ min}\right)$$

$$L = 75\ m$$

Volumen en la segunda sección:

$$V = caudal * tiempo$$

$$V = 0{,}014\,\frac{m^3}{s} * \left(5\ min * \frac{60\ s}{1\ min}\right)$$

$$V = 4{,}20\ m^3$$

Área transversal de un canal entre bafles:

$$A = \frac{caudal}{velocidad}$$

$$A = \frac{0{,}014\,\frac{m^3}{s}}{0{,}25\,\frac{m}{s}}$$

$$A = 0{,}056\ m^2$$

Profundidad del agua en los canales considerando un ancho a= 0,25

$$d = \frac{área}{ancho} = \frac{A}{a}$$

$$d = \frac{0{,}056\ m^2}{0{,}25\ m}$$

$$d = 0{,}22\ m$$

Se considera un factor de seguridad:

$$fs = 1{,}10$$
$$d_f = d * fs$$

$$d_f = 0{,}22\ m * 1{,}10$$

$$d_f = 0{,}25\ m$$

Espacio libre entre el tabique y la pared del tanque:

$$e = 1{,}5 * ancho$$

$$e = 1{,}5 * 0{,}25\ m$$

$$e = 0{,}38\ m$$

Longitud efectiva útil del canal, considerando que:

$$l = L_T - e$$

$$l = 14\ m - 0{,}38\ m$$

$$l = 13{,}62\ m$$

Número requerido de canales:

$$\#_{canales} = \frac{L}{l}$$
$$\#_{canales} = \frac{75\ m}{13{,}62\ m}$$

$$\#_{canales} = 5{,}50 \approx 5$$

Ancho total de la cámara de floculación, considerando b = 0,03m:

$$B_2 = \#_{canales} * a + (\#_{canales} - 1) * b$$

$$B_2 = 5 * 0{,}25 + (5 - 1) * 0{,}03m$$

$$B_2 = 1{,}4\ m \approx 1{,}5\ m$$

Radio hidráulico de la canaleta:

$$Rh = \frac{\text{área}}{Pm} = \frac{A}{2d_f + a}$$

$$Rh = \frac{0{,}056\ m^2}{2 * 0{,}25\ m + 0{,}25\ m}$$

$$Rh = 0{,}03733\ m$$

Pérdidas por fricción, considerando n = 0,012 s/m$^{1/3}$; rugosidad del canal (hormigón):

$$hf = \frac{(n * v)^2 * L}{Rh^{\frac{4}{3}}}$$

$$hf = \frac{(0{,}012\ \frac{s}{m^{1/3}} * 0{,}25\frac{m}{s})^2 * 75\ m}{(0{,}03733\ m)^{\frac{4}{3}}}$$

Pérdidas localizadas, el valor de K puede ser de 2 a 4:

$$hf_1 = K * (\#_{canales} - 1) * \frac{v^2}{2g}$$

$$hf_1 = 2 * (5 - 1) * \frac{\left(0{,}25\frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9{,}8\ \frac{m}{s^2}}$$

Pérdidas totales:

$$hf_T = hf + hf_1$$

$$hf_T = 0{,}054\ m + 0{,}032\ m$$

$$hf_T = 0{,}086\ m$$

Gradiente de velocidad:

$$G = \sqrt{\frac{\delta * hf_T}{\mu * tiempo}}$$

$$G = \sqrt{\frac{9803\frac{N}{m^3} * 0{,}086\ m}{0.001271\frac{kg}{m * s} * 300s}}$$

$G = 43{,}4$; si cumple, gradiente obtenido en laboratorio ($40\ s^{-1}$)

TERCERA SECCIÓN

Datos

$$v = 0{,}20\,\frac{m}{s}$$
$$t = 5\ min$$

Longitud de recorrido de agua en la tercera sección:

$$L = velocidad * tiempo$$
$$L = 0{,}20\,\frac{m}{s} * \left(5\ min * \frac{60\ s}{1\ min}\right)$$
$$L = 60\ m$$

Volumen en la tercera sección:

$$V = caudal * tiempo$$
$$V = 0{,}014\,\frac{m^3}{s} * \left(5\ min * \frac{60\ s}{1\ min}\right)$$
$$V = 4{,}20\ m^3$$

Área transversal de un canal entre bafles:

$$A = \frac{caudal}{velocidad}$$
$$A = \frac{0{,}014\,\frac{m^3}{s}}{0{,}20\,\frac{m}{s}}$$
$$A = 0{,}07\ m^2$$

Profundidad del agua en los canales considerando un ancho a= 0,30 m:

$$d = \frac{área}{ancho} = \frac{A}{a}$$
$$d = \frac{0{,}07\ m^2}{0{,}30\ m}$$
$$d = 0{,}23\ m$$

Se considera un factor de seguridad fs= 1,10:

$$d_f = d * fs$$

$$d_f = 0{,}22\ m * 1{,}10$$

$$d_f = 0{,}25\ m$$

Espacio libre entre el tabique y la pared del tanque:

$$e = 1{,}5 * ancho$$

$$e = 1{,}5 * 0{,}30\ m$$

$$e = 0{,}45\ m$$

Longitud efectiva útil del canal, considerando que L_T= 14 m:

$$l = L_T - e$$

$$l = 14\ m - 0{,}45\ m$$

$$l = 13{,}55\ m$$

Número requerido de canales:

$$\#_{canales} = \frac{L}{l}$$

$$\#_{canales} = \frac{60\ m}{13{,}55\ m}$$

$$\#_{canales} = 4{,}42 \approx 4$$

Ancho total de la cámara de floculación, considerando b = 0,03m:

$$B_3 = \#_{canales} * a + (\#_{canales} - 1) * b$$

$$B_3 = 4 * 0{,}30 + (4 - 1) * 0{,}03m$$

$$B_3 = 1{,}3m \approx 1{,}50\ m$$

Radio hidráulico de la canaleta:

$$Rh = \frac{\text{área}}{Pm} = \frac{A}{2d_f + a}$$

$$Rh = \frac{0{,}07\ m^2}{2 * 0{,}25\ m + 0{,}30\ m}$$
$$Rh = 0{,}088\ m$$

Pérdidas por fricción, considerando $n = 0{,}012\ s/m^{1/3}$; rugosidad del canal (hormigón):

$$hf = \frac{(n * v)^2 * L}{Rh^{\frac{4}{3}}}$$

$$hf = \frac{(0{,}012\ \frac{s}{m^{1/3}} * 0{,}20\ \frac{m}{s})^2 * 60\ m}{(0{,}0875\ m)^{\frac{4}{3}}}$$

$$hf = 0{,}009\ m$$

Pérdidas localizadas:

$$hf_1 = K * (\#_{canales} - 1) * \frac{v^2}{2g}$$

El valor de K puede ser de 2 a 4

$$hf_1 = 2 * (4 - 1) * \frac{\left(0{,}20\ \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9{,}8\ \frac{m}{s^2}}$$

$$hf_1 = 0{,}012\ m$$

Pérdidas totales:

$$hf_T = hf + hf_1$$

$$hf_T = 0{,}009\ m + 0{,}012\ m$$

$$hf_T = 0{,}021\ m$$

Gradiente de velocidad:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma * hf_T}{\mu * tiempo}}$$

$$G = \sqrt{\frac{9803 \frac{N}{m^3} * 0{,}021\ m}{0.001271 \frac{kg}{m * s} * 300s}}$$

$$G = 23{,}23; \ \text{si cumple, gradiente obtenido de laboratorio } (20\ s^{-1})$$

Ancho total

$$B = B_1 + B_2 + B_3$$

$$B = 1{,}5 + 1{,}5 + 1{,}5$$

$$B = 4{,}5 \approx 5m$$

Diseñar un floculador hidráulico de flujo horizontal, construido de hormigón armado, las placas de los tabiques son de fibrocemento de 2,40 metros de largo, 1,20 metros de altura y 0,006 metros de espesor. Para el diseño se considera que el agua se encuentra a una temperatura de 16 grados centígrados. El caudal de flujo es 100 litros/segundo. Tome en cuenta la siguiente tabla de datos.

Tabla 5
Viscosidad cinemática y temperatura

Temperatura °C	**Viscosidad cinemática Kg / m * s**
0,00	0,001792
1,00	0,001731
2,00	0,001674
3,00	0,001620
4,00	0,001569
5,00	0,001520
6,00	0,001473
7,00	0,001429
8,00	0,001386
9,00	0,001346

10,00	0,001308
11,00	0,001271
12,00	0,001236
13,00	0,001202
14,00	0,001170
15,00	0,001139
16,00	0,001109
17,00	0,001081
18,00	0,001054
19,00	0,001028
20,00	0,001003

Elaboración: Michelle Vasconez.

De acuerdo con la norma técnica la velocidad de flujo en los canales se encuentra en el siguiente rango 0,08 m/seg > Velocidad < 25 m/seg:

$$\text{Área} = \frac{Caudal}{Velocidad\ de\ flujo}$$

$$\text{Área} = \frac{0{,}100\ m^3/seg}{0{,}20\ m/seg}$$

$$\text{Área} = 0{,}50\ m^2$$

Si consideramos que la altura de agua en los canales es 1,05 metros se tiene:

$$\text{Área} = \text{base} * \text{altura}$$

$$\text{Base} = \frac{Área}{altura}$$

$$\text{Base} = \frac{0{,}50\ m^2}{1{,}05\ m}$$

$$\text{Base} = 0{,}48\ m$$

3.7 Unidad de decantación

Luego de la unidad de floculación tenemos la unidad de decantación cuyo objetivo principal es promover la sedimentación del material de tamaño coloidal por acción de la fuerza de gravedad.

La sedimentación de las partículas se consigue disminuyendo la velocidad de flujo dentro de la unidad. Se recomienda que esta unidad sea de forma rectangular y que el fondo tenga una inclinación al centro para facilitar su remoción.

3.7.1 Mecanismos de la decantación

En el momento en que una partícula se encuentra en esta unidad está sujeta a dos fuerzas, la primera horizontal inducida por la velocidad de flujo y la segunda vertical inducida por su peso propio.

En el momento en que la partícula desciende al fondo de la unidad su movimiento es parabólico. Si en el decantador la partícula solo posee ese movimiento, el tiempo necesario para que el agua lo atraviese será igual al tiempo que demora en llegar al fondo. El tiempo necesario se calcularía dividiendo el volumen del tanque para su caudal de tratamiento.

3.7.2 Zonas de un decantador

- *Zona de entrada:* esta zona se caracteriza por la presencia de turbulencia y cierta agitación por lo que se recomienda diseñar un vertedero de pared delgada.
- *Zona de decantación:* en esta zona hay una nube de flóculos que se encuentran prácticamente estacionarios, iniciando así su viaje al fondo de la unidad describiendo una trayectoria parabólica.
- *Zona de salida:* en esta zona se presenta un flujo muy tranquilo, se puede observar un porcentaje muy pequeño de

flóculos que no han podido sedimentarse en el fondo de la unidad.

- *Zona de depósito de lodos:* es la zona donde se acumulan todos los flóculos que se han sedimentado por la fuerza de gravedad, en esta zona no hay la influencia de la corriente de agua a no ser que ocurra un hecho inusual, como cambios bruscos de temperatura o la fermentación de lodos.

3.7.3 Ejemplo de diseño

Datos

$Q_{TOTAL} = 28\frac{l}{s}$

$Q_{DISEÑO} = 14\frac{l}{s}$; debido a que son dos unidades de floculadores Recomendado por Norma CO 10.07 – 601

$\mu_{T°=11°c} = 1{,}420x10^{-6}\ \frac{m^2}{s}$; viscocidad cinemática del agua

$v_{sedimentación} = 0{,}011\ \frac{cm}{s} = 9{,}504\ \frac{m}{día} \approx 10\frac{m}{día}$

Tipo de módulos de placas = planas

Dimensiones de las placas = 2,10m * 1,20m * 0,02m

$s_c = 1$; coeficiente por tipo de placa; Recomendado por NTE INEN 2655: 2012

L = 20m; longitud de recorrido por las placas de la unidad

Longitud recomenda por NORMA CO 10.07 < 30 m

$\theta = 60°$; ángulo de inclinación; Recomendado por NTE INEN 2655: 2012

Diseño de la zona de sedimentación

Cálculos

Cálculo de separación entre placas:

$$e = \frac{l}{L}$$

$$e = \frac{1{,}20\ m}{20\ m}$$

$$e = 0{,}06\ m$$

Distancia entre placas < 10 cm; Recomendado por NTE INEN 2655: 2012

Cálculo de la velocidad de flujo:

$$v_o = \frac{v_{sedimentación}}{s_c} * (\text{sen}\theta + L * \cos\theta)$$

$$v_o = \frac{0{,}011\,\frac{cm}{s}}{1} * (\text{sen } 60° + 20 * \cos 60°)$$

$$v_o = 0{,}125\,\frac{cm}{s} < 1\,\frac{cm}{s} \quad \text{; si cumple}$$

Cálculo del número de Reynolds:

$$R_e = \frac{v_o * e}{\text{Viscocidad cinemática}}$$

$$R_e = \frac{0{,}125\,\frac{cm}{s} * \frac{1\ m}{100\ cm} * 0{,}06\ m}{1{,}420x10^{-6}\ \frac{m^2}{s}}$$

$$R_e = 50{,}70 < 500 \ \therefore \text{flujo laminar}$$
$$\text{Re} < 500;\ \text{Recomendado por NTE INEN 2655: 2012}$$

Área de zona de sedimentación:

$$A = \frac{Q}{v_o * \text{sen } \theta}$$

$$A = \frac{0{,}014\ \frac{m^3}{s}}{0.00125\,\frac{m}{s} * \text{sen } 60°}$$

$$A = 12{,}93\ m^2$$

Dimensiones de la unidad de sedimentación:

$$\text{Área} = \text{largo} * \text{ancho}$$

$$\text{Ancho} = \frac{\text{área}}{\text{largo}}$$

$$\text{Ancho} = \frac{12{,}93\ m^2}{4{,}20\ m}$$

$$\text{Ancho} = 3\ m$$

El sedimentador es de flujo laminar, cálculo del tiempo de sedimentación:

$$t = \frac{l}{v_o}$$

$$t = \frac{1{,}20\ \mathrm{m}}{0{,}00125\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}$$

$$t = 960\ \mathrm{s} = 16\ \mathrm{min}$$

La carga hidráulica superficial debe estar entre 90 m/día a 180 m/d, recomendada por NORMA CO 10.07 – 601:

$$C_S = \frac{Q}{\text{Área superficial}}$$

$$C_S = \frac{14\frac{l}{s} * 86{,}4}{4{,}20\ \mathrm{m} * 3\ \mathrm{m}}$$

$$C_S = 96\frac{\mathrm{m}}{\text{día}}$$

Zona de entrada

a. Cálculo de la velocidad de flujo de entrada a la unidad de sedimentador:

$$v_e = \frac{Q}{\text{Área}}$$

$$v_e = \frac{0{,}014\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}}{0{,}8\ \mathrm{m} * 4{,}20\ \mathrm{m}}$$

$$v_e = 0{,}4166\mathrm{x}10^{-3}\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

$$v_e = 0{,}416\frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{s}}$$

Zona de lodos

El volumen en función de la NORMA CO 10.07 - 601 debe ser mayor al 50 % del volumen de la zona de sedimentación:

a. Volumen de zona de lodos

$$V_1 = \left[\frac{b.\,mayor + b.\,menor}{2} * h \text{ de trapecio}\right] * \text{ancho de sedimentador}$$

$$V_1 = \left[\frac{3{,}60\ m + 2\ m}{2} * 0{,}8\right] * 4{,}20\ m$$
$$V_1 = 9{,}41\ m^3$$

b. Volumen de zona de sedimentación

$$V_2 = \text{Ancho} * \text{largo de placas} * \text{ancho de sedimentador}$$
$$V_2 = 3\ m * 1{,}20\ m * 4{,}20\ m$$
$$V_2 = 15{,}12\ m^3$$

c. V lodos > 0,5*V sedimentación

$$9{,}41\ m^3 > 0{,}5 * 15{,}12\ m^3$$
$$9{,}41\ m^3 > 7{,}56\ m^3; \text{si cumple}$$

Zona de salida

a. Cálculo del caudal de recolección por metro lineal; 1 canaleta

$$q = \frac{Q}{l\ \text{vertimiento}}$$

$$q = \frac{14\frac{l}{s}}{2 * 3\ m}$$

$$q = 2{,}33\ \frac{\frac{l}{s}}{m};\ \text{si cumple}$$

$$q < 2{,}5\ \frac{\frac{l}{s}}{m};\ \text{Recomendado por NTE INEN 2655: 2012}$$

b. Como es una canaleta tendrá un caudal de 14 l/s. Cálculo de la altura de agua sobre la canaleta. Ancho de la canaleta = 0,30 m

$$Q_c = 1{,}375 * b * h_o^{\frac{2}{3}}$$

$$h_o = \left[\frac{Q_c}{1{,}375 * b}\right]^{\frac{2}{3}}$$

$$h_o = \left[\frac{0{,}014\ \frac{m^3}{s}}{1{,}375 * 0{,}30\ m}\right]^{\frac{2}{3}}$$
$$h_o = 0{,}105\ m$$
$$h_o = 10{,}5\ cm$$

Dato: Altura de la canaleta es de 15 cm

Diseño de filtro rápido

La condición que se debe cumplir para la correcta construcción del filtro es que la velocidad del lavado debe ser mayor a la velocidad de fluidización.

Datos generales

$$Q_{total} = 28\,\frac{l}{s} = 2419.2\,\frac{m^3}{d}$$
$$\mu_{T°=11°c} = 1.271\text{ cP; viscosidad dinámica del agua a }11°C$$
$$C_s = 180\,\frac{m}{día}\text{ ; carga superficial normal}$$
$$Cs_{máx} = 240\,\frac{m}{día}\text{ ; carga superficial máxima}$$
$$\text{Porosidad de la arena} = 0.45$$
$$\text{Porosidad de la antracita} = 0.50$$
$$b = 0.30\text{ m ; ancho de la canaleta}$$
$$BL = 0.12\text{ m ; borde libre de la canaleta}$$
$$t_l = 10\text{ min ; tiempo de lavado del filtro}$$
$$CF = 24\text{ h; Carrera del filtro}$$

Zona de filtración

Número de filtros rápidos:

Carga superficial (C_s)

$$C_s * n = \frac{Q}{A_f}$$

Carga superficial máxima

$$Cs_{máx} * (n-1) = \frac{Q}{A_f}$$

Igualamos los términos de la carga superficial y la carga superficial máxima para determinar el número de filtros:

$$C_s * n = Cs_{máx} * (n-1)$$

$$180\,\frac{m}{día} * n = 240\,\frac{m}{día} * (n-1)$$
$$n = 4$$

Carga superficial de la planta cuando un filtro se encuentre en mantenimiento:

a) Caudal de diseño

$$Q_{Diseño} = \frac{28}{n}$$

$$Q_{Diseño} = \frac{28\ \frac{L}{s}}{4}$$

$$Q_{Diseño} = 7\ \frac{L}{s} * 86.4$$

$$Q_{Diseño} = 604.8\ \frac{m^3}{día}$$

b) Área de filtración

$$A_f = \frac{Q_D}{n * C_s}$$

$$A_f = \frac{604.8\ \frac{m^3}{día}}{1 * 180\ \frac{m}{día}}$$

$$A_f = 3.36\ m^2$$

Dimensionamiento del filtro

Para el dimensionamiento del filtro se considera una altura de 2.0 m y para el mantenimiento del canal se asume una entrada de 0.80 m para que se facilite su mantenimiento.

$$h = \frac{A}{L}$$

$$h = \frac{3.36\ m^2}{2\ m}$$

$$h = 1.68\ m$$

El filtro será de 2.0 m x 1.68 m

Carga superficial máxima cuando un filtro se encuentre en mantenimiento por lavado:

$$Cs_{máx} = \frac{Q}{(n-1) * A_f}$$

$$Cs_{máx} = \frac{2419.2 \ \frac{m^3}{día}}{(4-1) * 3.36 \ m^2}$$

$$Cs_{máx} = 240 \ \frac{m}{día}$$

Velocidad de arrastre para la arena

Según (CPE INEN 005-9-1, 1992), establece que para el diseño se toma el valor de la velocidad de arrastre más bajo.

a) Tamaño de partículas para el 60 % que pasa (arena)

$$D_{60} = Te * Cu$$

$$D_{60} = 0.50 \ mm * 1.40$$

$$D_{60} = 0.70 \ mm$$

b) Velocidad de arrastre para arena (Va)

$$V_a = 10 * D_{60}$$

$$V_a = 10 * 0.70 \ mm$$

$$V_a = 7 \ \frac{m}{min}$$

Velocidad de arrastre para la antracita

a) Tamaño de partículas para el 60 % que pasa (antracita)

$$D_{60} = Te * Cu$$

$$D_{60} = 0.80 \ mm * 1.40$$

$$D_{60} = 1.12 \ mm$$

b) Velocidad de arrastre para antracita (Va)

$$V_a = 4.7 * D_{60}$$

$$V_a = 4.7 * 1.12\ mm$$

$$V_a = 5.3\ \frac{m}{min}$$

Velocidad de lavado

Para determinar la velocidad del lavado previamente se calcula la velocidad de fluidización, pues esta depende de la porosidad del medio, es decir, es la velocidad mínima que se necesita para que el lecho se expanda lo suficiente y permita que se lave.

a) Velocidad de fluidización para arena

$$V_f = V_a * (Porosidad)^{4.5}$$

$$V_f = 7\ \frac{m}{min}\ (0.45)^{4.5}$$

$$V_f = 0.19\ \frac{m}{min}$$

b) Velocidad de fluidización para antracita

$$V_f = V_a * (Porosidad)^{4.5}$$

$$V_f = 5.3\ \frac{m}{min} * (0.50)^{4.5}$$

$$V_f = 0.23\ \frac{m}{min}$$

Nota: La velocidad de fluidización más desfavorable es el que tiene el valor mayor.

Velocidad de lavado a 20 °C

La velocidad de lavado será el 10 % de la velocidad de arrastre más baja, y esta a su vez debe ser mayor a la velocidad de fluidización más desfavorable.

$$V_{L1} = 0.10 * V_a$$

$$V_{L1} = 0.10 * 5.3\ \frac{m}{min}$$

$$V_{L1} = 0.53\ \frac{m}{min}$$

Corrección de la velocidad de lavado para una temperatura de 11º C:

$$V_L = \frac{V_{L1}}{\sqrt[3]{\mu}}$$

$$V_L = \frac{0.53\ \frac{m}{min}}{\sqrt[3]{1.271\ cP}}$$

$$V_L = 0.49\ \frac{m}{min}$$

Diseño de las canaletas de lavado

a) Caudal de lavado (Q_L)

$$Q_L = V_L * A_f$$

$$Q_L = \frac{0.49 * 3.36}{60}$$

$$Q_L = 0.02744\ \frac{m^3}{s}$$

b) Lámina de agua de la canaleta

$$Q = 1.375 * b * h_o^{\frac{3}{2}}$$

$$h_o = \left(\frac{0.02744}{1.375 * 0.30}\right)^{\frac{2}{3}}$$

$$h_o = 0.16\ m$$

c) Altura total de la canaleta (h_T)

$$h_T = h_o + BL$$

$$h_T = 0.16 + 0.12$$

$$h_T = 0.28\ m$$

Volumen de agua para lavar el filtro (V_{lavado})

$$\mathbf{V_{lavado}} = Q_L * t_l$$

$$\mathbf{V_{lavado}} = 0.02744\ \frac{m^3}{s} * \left(10\ min * 60\ \frac{s}{min}\right)$$

$$\mathbf{V_{lavado}} = 16.46\ m^3$$

Volumen filtrado en un día

$$\mathbf{V_f} = Q_D * CF$$

$$\mathbf{V_f} = 604.8\ \frac{m^3}{día} * 1día$$

$$\mathbf{V_f} = 604.8\ m^3$$

Porcentaje del agua del lavado (XL)

$$X_L = \frac{V_{lavado} * 100\%}{Q_D}$$

$$X_L = \frac{(16.46\ m^3 * 100\%)}{604.8\ m^3}$$

$$X_L = 2.7\ \%$$

Diseño del tanque de cloración

Datos

$Q_{total} = 28\,\frac{l}{s}$
$TRH = 20\ min$

Volumen del tanque de cloración:

$$V_{tanque} = Q_{total} * TRH$$

$$V_{tanque} = 28\,\frac{l}{s} * 20min * \frac{60\ s}{1\ min} * \frac{1\ m^3}{1000\ l}$$

$$V_{tanque} = 1{,}68\ m^3$$

Altura del tanque, se asumen las siguientes condiciones: 2a=l y p=h

$$V_{tanque} = a * l * p$$

$$V_{tanque} = \frac{l}{2} * l * l$$

$$V_{tanque} = \frac{l^3}{2}$$

$$h = \sqrt[3]{2 * V_{tanque}}$$

$$h = \sqrt[3]{2 * 1{,}68\ m^3}$$

$$h = 1{,}49\ m \approx 1{,}50m$$

$$a = \frac{l}{2} = \frac{1{,}50m}{2} = 0{,}75\ m$$

$$p = 0{,}75\ m$$

Diseño del tanque de almacenamiento

Datos

$Q_{total} = 28\frac{l}{s}$
$t = 24$ h; tiempo de almacenamiento en el tanque

Volumen de regulación

Según la norma CPE-INEN 5 Parte 9-1, para poblaciones mayores a 5000 habitantes, se tomará para el volumen de regulación el 25 % del volumen consumido en un día, considerando la demanda media diaria al final del periodo de diseño.

$$\mathbf{V_r = 0,25 * Dot\ final * pob\ final * 1\ día}$$

$$V_r = 0{,}25 * 190\frac{\frac{l}{hab}}{día} * 11240hab * 1\ día * \frac{m^3}{1000\ l}$$

$$V_r = 533{,}9\ m^3$$

Volumen de protección contra incendios

Para determinar el volumen de reserva para incendios en poblaciones menores a 10 000 habitantes, se adopta un caudal de 5 $^{l}/_{s}$ durante un tiempo de protección de 2 horas, que será suministrado por bocas de fuego (Lárraga, 2016).

$$V_i = 5\frac{l}{s} * 2\ h * \frac{m^3}{1000\ l} * \frac{3600\ s}{1\ h}$$

$$V_i = 36\ m^3$$

Volumen de emergencia

Según la norma CPE-INEN 5 Parte 9-1, para poblaciones mayores a 5000 habitantes, se tomará el 25 % del volumen de regulación.

$$Ve = Vr * 0{,}25$$

$$Ve = 533{,}9 * 0{,}25$$

$$Ve = 133{,}47\ m^3$$

Volumen de planta de tratamiento

$$Vpta = Q_{diseño} * 1\ día * 0{,}05$$

$$Vpta = 28\frac{l}{s} * 1\ dia * 0{,}05 * \frac{1\ m^3}{1000\ l} * \frac{3600\ s}{1\ h} * \frac{24\ h}{1\ día}$$

$$Vpta = 120{,}96\ m^3$$

Volumen total de almacenamiento

$$V_T = V_r + V_i + V_e + V_{pta}$$

$$V_T = 533{,}9\ m^3 + 36\ m^3 + 133{,}47\ m^3 + 120{,}96\ m^3$$

$$V_T = 569{,}9\ m^3 \approx 570\ m^3$$

Se aplica la relación 2a=l, h = 5 m (estimado):

$$V_T = a * l * h$$

$$V_T = a * 2a * h$$

$$\frac{V_T}{2 * h} = a^2$$

$$a = \sqrt{\frac{V_T}{2 * h}}$$

$$a = \sqrt{\frac{570\ m^3}{2 * 5\ m}}$$

$$a = 7{,}55 \approx 7{,}6\ m$$

$$l = 2 * a = 2 * 7{,}6 = 15{,}2\ m$$

3.8 Filtración

Se define a la filtración como el proceso de remoción de partículas coloidales y suspendidas en un medio acuoso mediante un medio poroso. Esta unidad de tratamiento en las plantas de tratamiento se ubica luego de la unidad de coagulación y antes de la unidad de cloración.

3.8.1 Mecanismos de filtración

Las fuerzas que mantienen adheridas a las partículas al medio filtrante son dos mecanismos distintos y son el transporte y la adherencia. Como parte inicial de este proceso, las partículas coloidales son transportadas hasta el medio filtrante y luego las partículas son adheridas al medio filtrante siempre y cuando resista las fuerzas de corte del fluido.

- Los factores que influyen en el transporte de las partículas es la filtración de acción superficial y la profundidad. El 90 % de las partículas removidas se localizan sobre el medio filtrante y el 10 % restante se localiza en el medio filtrante.

- El impacto inercial se considera despreciable cuando las partículas suspendidas tienen un tamaño de 0,01 y 0,10 µm y su densidad se encuentra entre 1,0 a 2,65 kg/m³ en el momento que el flujo es laminar. El flujo que prevalece es laminar por lo que las partículas se mueven a lo largo de las líneas de corriente.
- El efecto de la gravedad sí tiene mucha influencia en este proceso, la velocidad de sedimentación se puede calcular con la fórmula de Stokes. Por ejemplo, la velocidad de sedimentación para las partículas de arcilla de diámetro 10 µm es 0,1 mm/segundo tomando en cuenta que la densidad del agua es $\gamma = 1000$ kg/m³; la viscosidad absoluta del agua es $\mu = 10^{-3}$ kg/m/seg; y, la densidad de la partícula es $\gamma = 2500$ kg/m³.
- Las partículas pequeñas se caracterizan por tener un movimiento errático cuando se encuentran suspendidas en la masa de agua, mientras que las demás partículas se caracterizan por tener el movimiento conocido como movimiento browniano debido a la disminución de la viscosidad del agua.
- La eficiencia de la remoción de las partículas suspendidas en el medio filtrante está en función de los siguientes parámetros:

  – Tipo de partículas que se encuentran en suspensión.
  – Tamaño de las partículas.
  – Densidad de las partículas.
  – Temperatura del agua.
  – Concentración de partículas.
  – pH del afluente.

- Para el diseño del medio filtrante se debe considerar:

  – *El tipo de medio filtrante:* el medio filtrante más eficaz es aquel que es diseñado con una granulometría específica, los granos con cierto peso específico, requiere una

cantidad mínima de agua para su lavado y es capaz de remover la mayor cantidad de partículas.

– *El tamaño efectivo del material filtrante:* el tamaño efectivo de las partículas se refiere a granos correspondiente al 10 %, el coeficiente de uniformidad es igual a la relación del tamaño de los granos correspondiente al 60 %, el coeficiente de esfericidad es la relación entre el diámetro de una esfera y la velocidad de sedimentación del grano considerado y el peso específico.
– *El espesor de la masa filtrante:* el espesor del medio filtrante se encuentra en función de los siguientes parámetros: la tasa de filtración, la turbiedad límite fijada, pérdidas de carga y las características del medio filtrante.

3.8.2 Filtración lenta

Es el método más antiguo de purificación del agua para consumo humano y se utiliza principalmente en las plantas de tratamiento. El proceso de purificación consiste en hacer pasar el agua por diferentes capas de material filtrante.

- *Ventajas:*
  – Es una unidad de tratamiento muy simple.
  – Las capas de arena tienen diseños específicos.

- *Restricciones:*
  – No es aconsejable para agua que tenga un rango de turbiedad de 20 NTU a 30 NTU.
  – La eficiencia de esta unidad disminuye con temperaturas de agua inferiores a 4 grados centígrados.
  – La presencia de biosidas o plaguicidas en el agua es perjudicial para el proceso de filtración.

- *Características de funcionamiento:*
  – Velocidad de filtración mínima es 0,94 m^3/m^2/día.
  – Velocidad de filtración máxima es 2,80 m^3/m^2/día.

- Profundidad del lecho de grava es 30 cm.
- Profundidad del lecho de arena es 1,0 m.
- Diámetro de la arena es 0,25 mm a 0,35 mm.
- Diámetro de la grava es 50 mm a 80 mm.
- Pérdida de carga inicial es 1,50 cm.
- Pérdida de carga final es 3,00 cm.
- La limpieza se realiza cada 20 días.
- Penetración de la materia suspendida es superficial.

3.8.3 Filtración rápida

Este tipo de unidades de filtración son las más utilizadas en las plantas de tratamiento en las plantas de agua potable, este tipo de unidades puede trabajar con flujos descendentes o ascendentes.

- *Ventajas:*
  - El proceso de filtración opera con la cuarta parte de la carga hidráulica requerida.
  - La operación con tasa declinante reduce considerablemente el deterioro del efluente.
  - No se requiere la construcción de tanque elevado.
  - No se requiere bombas para el lavado de los filtros.

- *Restricciones:*
  - En plantas de tratamiento se recomienda diseñar dos unidades con la finalidad de garantizar la potabilización del agua.
  - Los filtros se lavan de forma escalonada.

- *Características de funcionamiento:*
  - La velocidad mínima de filtración es 9,30 m^3/m^2/día.
  - La velocidad máxima de filtración es 280,0 m^3/m^2/día.
  - Profundidad del lecho de grava es 45 cm.
  - Profundidad del lecho de arena es 75 cm.
  - Diámetro de la arena es 0,45 mm.
  - Diámetro de la grava es 50 mm a 80 mm.

– Perdida de carga inicial es 30 cm.
– Perdida de carga final es 2,75 cm.
– La limpieza se realiza cada 24 horas.

3.9 Desinfección del agua

3.9.1 Introducción

La última unidad en el proceso de tratamiento del agua potable es la unidad de desinfección cuyo objetivo es añadir cloro al agua para conseguir su desinfección, la cloración se puede realizar con cloro líquido, hipocloritos o cal clorada.

3.9.2 Cloro líquido

Es la metodología más utilizada en las plantas de tratamiento de agua potable, se consigue en bombonas bajo presión con pesos de 40, 68 y 900 kilogramos y para controlar su inyección en el agua se coloca sobre balanzas electrónicas.

La cantidad de cloro que se puede extraer de estas bombonas es la siguiente:

- 8 kg/día por cilindro de 40 kg.
- 16 kg/día por cilindro de 68 kg.
- 180 kg/día por cilindro de 900 kg.

Las precauciones que se deben tomar en cuenta en el uso del cloro líquido son las siguientes:

- Debe mantenerse en ambientes con temperaturas no mayores a 30 °C.
- Usar máscara de protección al momento de manipular el cloro líquido debido a que es altamente tóxico.
- El gas cloro no es corrosivo.
- Para verificar las fugas de cloro líquido se utiliza amoníaco.

- Nunca se debe colocar directamente en grandes cantidades el cloro líquido a la masa de agua debido a que se forma ácido clorhídrico.
- El cloro debe ser manipulado por personas preparadas.
- Tener cuidado de no generar fuego cerca de los depósitos de cloro líquido.

3.10 Reservorios

3.10.1 Introducción

Los reservorios que se construyen en las plantas de tratamiento de agua potable tienen como objetivo acumular adecuadamente el agua ya tratada para la distribución a la zona del proyecto.

El tamaño de los reservorios está en función de la población futura en el proyecto y en función del tamaño de la red de distribución, la misma que a más de las acometidas disponen de hidrantes.

Se recomienda que la cota topográfica de localización de los reservorios que sea de 30 metros sobre la cota media del proyecto y en su diseño se tomarán en cuenta las siguientes recomendaciones técnicas:

- La tubería de salida en el tanque se colocará a igual nivel que el fondo del mismo con el objetivo de garantizar las operaciones de mantenimiento.
- En cualquier nivel del agua en el reservorio se garantizará la presión mínima en la red de distribución, es decir, en proyectos urbanos 18 metros de columna de agua y en proyectos rurales 8 metros de columna de agua.
- En la parte superior del reservorio se colocará tuberías de ventilación mediante tuberías de P.V.C. de 3 pulgadas de diámetro.
- En el diseño geométrico del reservorio se debe considerar una relación ancho largo de 1,5:1 2:1 2,5:1.

- La tubería de ingreso del agua al reservorio debe tener acoplada una boya flotante para garantizar que no exista el desbordamiento del líquido.

3.10.2 Volumen de almacenamiento

Al definir el volumen del tanque de almacenamiento se debe garantizar al menos un abastecimiento permanente durante 48 horas continuas.

El cálculo del volumen diario de regulación se hará en función del tamaño de la población, es decir, para poblaciones menores a 5000 habitantes se debe considerar un volumen del 30 % del volumen de consumo diario, y para proyectos con poblaciones mayores a 5000 habitantes se debe considerar un volumen del 25 % del volumen diario de consumo.

En proyectos en los cuales la población futura alcanza los 5000 habitantes, el volumen contra incendios se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen incendio} = 25 * \sqrt[2]{Población\ en\ miles\ de\ hab.}\ [m^3]$$

En proyectos en los cuales la población futura se encuentra entre 5000 a 20 000 habitantes, el volumen contra incendios se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen incendio} = 50 * \sqrt[2]{Población\ en\ miles\ de\ hab.}\ [m^3]$$

En proyectos en los cuales la población futura es mayor a 20 000 habitantes, el volumen contra incendios se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen incendio} = 100 * \sqrt[2]{Población\ en\ miles\ de\ hab.}\ [m^3]$$

Es necesario considerar un volumen de emergencia con la finalidad de garantizar agua de calidad a la población ante cualquier eventualidad considerando las siguientes normas técnicas:

- En proyectos con poblaciones futuras menores a 5000 habitantes se considerará un 10 % del volumen de regulación.
- En proyectos con poblaciones futuras mayores a 5000 habitantes se considerará un 25 % del volumen de regulación.

Finalmente, el volumen total del reservorio se determina utilizando la siguiente fórmula:

Volumen total = V regulación + V incendios + V emergencia

Capítulo 4

Epidemiología hídrica y prevención de enfermedades de transmisión hídrica

4.1 Epidemiología hídrica

Según la Organización Mundial de la Salud, epidemiología es "el estudio de la distribución y los determinantes de estados o eventos (en particular de enfermedades) relacionados con la salud y la aplicación de esos estudios al control de enfermedades y otros problemas de salud". Es decir, la epidemiología es el estudio de la frecuencia con la que ocurren las enfermedades en diferentes grupos de personas y por qué. De esta manera, es la base para la salud pública y la medicina preventiva. El estudio epidemiológico se puede aplicar a otros efectos sobre la salud como el envenenamiento por arsénico, aunque es menos común.

Cuando hablamos de epidemiología hídrica, nos referimos a las enfermedades relacionadas con el agua. Estas se refieren a enfermedades en las que el agua juega un papel importante en algún punto del ciclo de la enfermedad, ya sea en la contaminación de la persona o en el ciclo de vida del patógeno.

- *Enfermedades transmitidas por el agua:* son enfermedades causadas por la ingesta de agua contaminada o por alimentos qua hayan estado en contacto con agua contaminada.

Ejemplos de este tipo de enfermedades son el cólera, la fiebre tifoidea, la hepatitis A y E, enfermedades diarreicas y la poliomielitis.

- *Enfermedades relacionadas al agua:* incluyen enfermedades como el dengue, en la que el agua estancada juega un papel vital en el ciclo de vida del vector, el mosquito *Aedes Aegypti.*
- *Enfermedades causadas por la escasez de agua:* cuando la cantidad de agua en el ecosistema baja, ciertos elementos que no causarían grandes problemas de salud se encuentran en mayores concentraciones y pueden ocasionar enfermedades causadas por altas concentraciones de calcio, hierro, yodo, etc. Además, la falta de agua está directamente relacionada a malos hábitos de higiene, que a su vez provocan una gran cantidad de enfermedades.

En este capítulo nos enfocaremos en las enfermedades transmitidas por el agua, en específico por patógenos, puesto que estas son las de mayor preocupación en el diseño y operación de plantas de tratamiento de agua potable, además de más prevalentes. Sin embargo, es importante tener en mente las enfermedades relacionadas con el agua y evitar generar condiciones propicias para la propagación de vectores, como por ejemplo evitar acumulación de agua empozada que atraiga mosquitos.

4.1.1 Cómo se produce la contaminación

Las sequías, el cambio climático, la falta de tratamiento de aguas residuales, la contaminación humana, los derrames de petróleo, el vertido de desechos industriales y metales pesados en el agua y el mal manejo y eliminación de residuos sólidos son las principales causas de la contaminación del agua en América Latina. Los mecanismos y tipos de contaminación se han mencionado en capítulos anteriores.

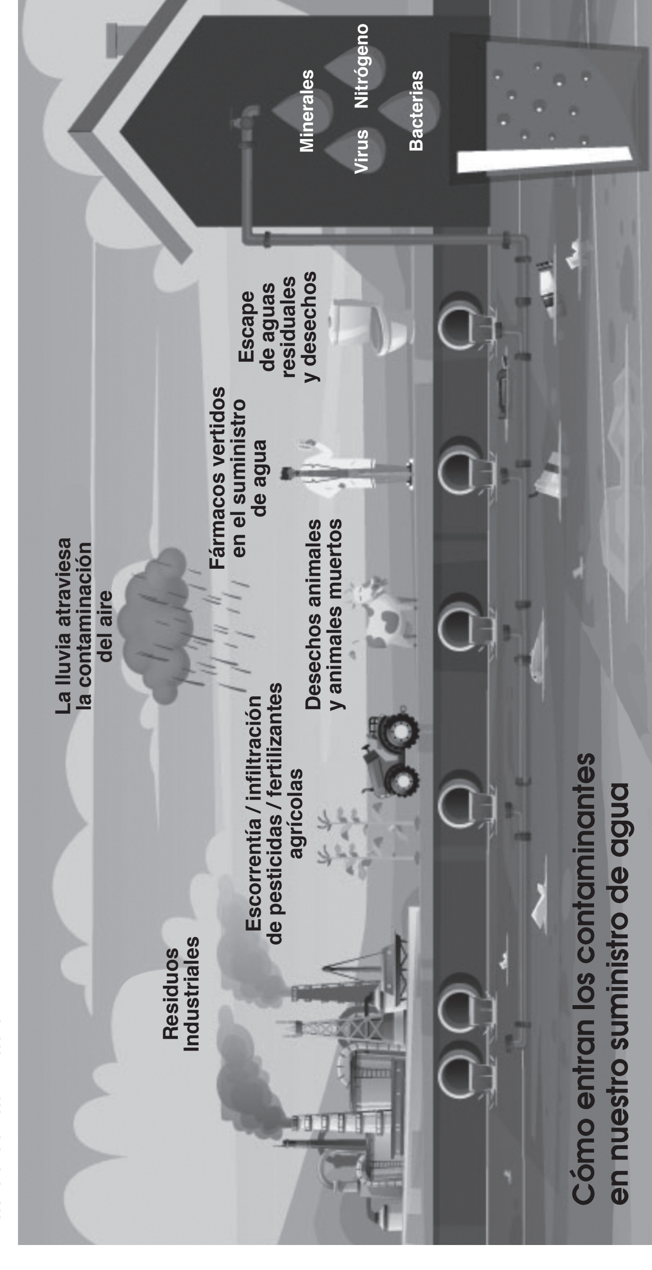


Figura 2
Vías de contaminación

La contaminación se puede dar en cualquier punto del sistema de captación, transporte y distribución del agua potable. En caso de tener un tratamiento adecuado, sigue siendo importante mantener un monitoreo adecuado de la distribución postratamiento, ya que puede significar una recontaminación del líquido vital antes de que llegue al consumidor.

Factores como el cambio climático pueden provocar una mayor exposición al agua no apta para consumo. La frecuencia de inundaciones, sequías, lluvias intensas, cambios en los patrones de lluvia y aumentos en la temperatura y el nivel del mar son consecuencias conocidas del cambio climático. Evidentemente, estas alteraciones del ciclo hídrico y climático afectarán a los componentes biológicos, físicos y químicos del agua a través de diferentes vías, aumentando así el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua (Funari *et al.*, 2012).

4.1.2 Cómo se adquiere la enfermedad

La transmisión de enfermedades relacionadas al agua es el resultado de las interacciones entre la hidrología y la ecología de los huéspedes, los vectores y los parásitos. Cuando hablamos de enfermedades transmitidas por el agua, la ingesta de agua con la presencia de patógenos es normalmente la causa de la enfermedad. Sin embargo, existen ciertos patógenos que contaminan al ser humano por el contacto con la piel, como la dermatitis, o por medio de la inhalación del patógeno como la meningoencefalitis amebiana primaria (MAP). Esta enfermedad producida por la ameba *Naegleria fowleri* (también conocida como ameba comecerebros), se produce por la inhalación directa de agua contaminada con el patógeno y, a pesar de ser una enfermedad poco común, la alta tasa de fatalidad requiere el monitoreo constante de zonas en las que existe una descarga de agua con la temperatura adecuada para la presencia de y así poder evitar que las personas utilicen la zona para nadar.

El uso de agua no potable y la eliminación incorrecta de las excretas provocan la exposición a parásitos y vectores de contaminación presentes en el medioambiente que pueden provocar enfermedades infecciosas transmitidas a través del agua. Los microorganismos patógenos que causan enfermedades pueden dividirse en:

- *Bacterias:* son organismos unicelulares que normalmente varían en tamaño de 0,1 a 10 µm. La forma, los componentes y el tamaño en el que crecen pueden caracterizar la estructura física de la célula bacteriana. La forma de una bacteria como organismo individual viene dada por la rigidez de su pared. También es una característica de cada tipo bacteriano. Las bacterias suelen adoptar fundamentalmente alguna de las siguientes formas: esférica, cilíndrica, helicoidal, filamentosa o formas intermedias de los casos anteriores.
- *Virus:* son microorganismos compuestos por el material genético ácido desoxirribonucleico (ADN) o ácido ribonucleico (ARN) y una cubierta proteica protectora (mono, doble o parcialmente bicatenaria). Los virus son parásitos obligados, incapaces de llevar a cabo cualquier forma de metabolismo y completamente dependientes de las células huésped para la replicación. Los virus suelen tener un tamaño de 0,01 a 0,1 µm y son muy específicos de la especie con respecto a la infección, por lo general atacan solo a un tipo de huésped. Es importante notar que no todos los virus se transmiten por el agua, la tasa de transmisión depende de la composición del virus y su ciclo de vida. No existe ninguna indicación de que el virus COVID-19, por ejemplo, se transmita por el agua según la Organización Mundial de la Salud y el Centro para el Control y Prevención de Enfermedades (CDC) de EE.UU., aunque el virus ha sido encontrado en aguas residuales, el riesgo de contagio se considera bajo (WHO, 2021; CDC, 2021).

- *Protozoarios:* son microorganismos eucarióticos unicelulares sin paredes celulares que utilizan bacterias y otros organismos como alimento. La mayoría de los protozoarios son de vida libre en la naturaleza y pueden encontrarse en el agua; sin embargo, varias especies son parásitas y viven en organismos hospedadores o dentro de ellos. Los organismos huéspedes pueden variar desde organismos primitivos como las algas hasta organismos muy complejos como los seres humanos.

Además de estos, existen otras causas para enfermedades en el agua como los helmintos (parásitos eucariotas multicelulares con tamaño entre 1 y 10 mm) y la presencia de minerales dañinos (como el arsénico). Normalmente, las algas no se consideran patógenos. Sin embargo, las floraciones de algas a menudo se asocian con impactos negativos en los seres humanos y el medioambiente, debido a la producción de toxinas naturales y el daño mecánico a otros organismos.

Este capítulo se centra en microorganismos patógenos. La presencia de estos en los cuerpos hídricos está normalmente asociado a la falta de saneamiento adecuado, y el contacto con descargas contaminadas. Además, otros factores como temperatura y pH pueden generar condiciones óptimas para la supervivencia de estos patógenos en el agua.

4.1.3 Cómo se producen las epidemias

Para poder entender cómo se producen las epidemias, debemos indicar las diferencias entre ciertos términos: brote, epidemia y pandemia. Estos términos se refieren a un aumento significativo en casos de una enfermedad específica. Sin embargo, un brote se refiere al surgimiento de dos o más casos de una misma enfermedad y que están epidemiológicamente relacionados. Una epidemia se refiere a un gran número de casos de una misma enfermedad contagiosa en un espacio geográfico determinado o una población determinada

durante un periodo de tiempo. Una pandemia se refiere a una epidemia que traspasa los límites geográficos y se expande por varios países. La principal diferencia entre una pandemia y una epidemia es la escala del contagio.

Las epidemias se producen por una propagación acelerada de enfermedades contagiosas. En el caso de enfermedades de origen hídrico, las epidemias se originan cuando un mismo cuerpo hídrico que abastece a una gran cantidad de personas se encuentra contaminado.

La Organización Mundial de la Salud estima que, anualmente, 4 mil millones de casos de enfermedades relacionadas al agua causan 3,4 millones de muertes en todo el mundo, y es una de las principales causas de muerte y en niños menores de 5 años. En 2017, las enfermedades diarreicas fueron responsables por 1,6 millones de muertes y representaron el 3,6 % de la carga mundial de morbilidad (AVAD). Asimismo, la diarrea mata a 2195 niños cada día, más que el sida, la malaria y el sarampión juntos (Liu *et al.*, 2012). En América Latina, las enfermedades transmitidas por el agua más comunes incluyen la fiebre tifoidea, cólera, giardia, disentería, E. coli, hepatitis A y salmonela.

Los países en desarrollo se enfrentan a importantes riesgos para la salud debido a las enfermedades infecciosas transmitidas por el agua, que son los mayores riesgos de mortalidad relacionados con el agua a los que se enfrentan los hogares en estos países. La distribución inadecuada de agua potable o los servicios de saneamiento deficientes aumentan la probabilidad de una mayor mortalidad por enfermedades relacionadas con el agua y el saneamiento. También existe la posibilidad de contaminación de las fuentes de agua por la actividad agrícola y minera, lo que puede tener impactos negativos muy significativos en la salud.

4.1.4 Cómo se lleva a cabo la investigación epidemiológica

La historia de la epidemiología como disciplina se remonta a Hipócrates y ha sido llevada a cabo por personas como John Graunt, William Farr, John Snow y otros. Consiste en la aplicación del método científico a la incidencia, brotes o epidemias de enfermedades. Las distribuciones de enfermedades determinadas estadísticamente dentro de las poblaciones forman la base de la epidemiología, por lo que la investigación epidemiológica es fundamental para generar políticas públicas eficientes y proteger a las comunidades vulnerables y prevenir futuros brotes de enfermedades. Estos estudios pueden separarse en dos tipos principales (Woodward, 2013):

- *Observacional:* no existe una intervención directa del investigador, se observa el trascurso de la enfermedad y se nota las características de la población afectada, factores de contagio, frecuencia y distribución. Estos estudios nos permiten determinar una fuerte asociación entre una determinada exposición y enfermedad. Sin embargo, no es posible asegurar causalidad. Dentro de este tipo de estudio se destacan:
  - **Estudio ecológico:** explora la distribución de factores de riesgo en las diferentes poblaciones y la asociación entre la exposición y los resultados de salud. Un ejemplo clásico de un estudio ecológico es el mapa del cólera desarrollado por John Snow en Londres. Con observaciones espaciales de un brote particular de cólera pudo determinar que la gente contaminada bebió de un mismo pozo de agua, así concluyó que el agua estaba contaminada.
  - **Estudio de cohorte:** grupos de exposición. Primero se determina la población de estudio y, si se establece antes de que el brote o epidemia surja, se conoce como *estudio de cohorte prospectivo* y si se establece el estudio

una vez que la población de estudio ya está infectada se conoce como *estudio de cohorte retrospectivo*. Es importante notar que a pesar de que los estudios retrospectivos son más comunes, estos sufren un sesgo de recuerdo (tanto de la exposición como de los efectos). Una vez determinada la población, se define la exposición a considerar y los impactos a la salud (resultados) a ser considerados. Finalmente, se examina la asociación entre exposición(es) y resultado(s). La validez de este tipo de estudios está altamente relacionada a la calidad de la toma de datos y el tamaño de la cohorte.

– **Estudio de casos y control:** grupos de enfermedades. Suelen ser retrospectivos y divergen del estudio de cohortes porque cuentan con un grupo de control dentro de la población de estudio, es decir, existe un grupo de la población infectada y otro grupo de la misma población saludable.

- *Experimental:* se caracteriza por una intervención activa para alterar la exposición, como en ensayos randomizados. Este tipo de estudio puede demostrar una causalidad verdadera entre la exposición y la enfermedad. Sin embargo, suele realizarse solamente para enfermedades leves y por consideraciones éticas, además de exigir más recursos que los estudios observacionales.

En esencia, existen varias maneras de diseñar investigaciones epidemiológicas y estas buscan registrar los brotes en poblaciones determinadas y señalar correlaciones. La mayoría de las veces interpretamos lo que se ha hecho, por lo que es necesario comprender los beneficios y las limitaciones.

4.2 Prevención de las enfermedades

La prevención de este tipo de enfermedades es una cuestión de salud pública, campañas de concientización a nivel comunitario son importantes para asegurar que los consumidores mantengan una higiene personal adecuada, un manejo e higienización adecuada de alimentos y el consumo de agua adecuadamente potabilizada. Sin embargo, si los sistemas públicos de agua potable fallan en los procedimientos de desinfección adecuados, se puede generar brotes e incluso epidemias de enfermedades transmitidas por el agua.

Sistemas centralizados: cuando el agua pasa por un sistema de tratamiento centralizado, que incluye una adecuada desinfección en la planta de tratamiento, el riesgo de contaminación baja. Un método muy simple de desinfección del agua es llevarla a su punto de ebullición (durante al menos 1 minuto), esto mata a la mayoría de los organismos patógenos, en particular a los virus y bacterias que causan enfermedades transmitidas por el agua. Sin embargo, esto no significa que el agua sea segura para beber, ya que elementos como el arsénico, los nitratos y los pesticidas no se ven afectados. Y dado que, al hervir, se reduce el volumen de agua, la concentración de esos contaminantes aumenta. Por lo tanto, este método se recomienda para emergencias o de forma esporádica.

En general, para poder evitar efectivamente epidemias relacionadas al agua, es necesario un monitoreo constante, la recolección e interpretación correcta de datos de salud pública y la concientización de los consumidores.

4.3 Abastecimiento hídrico

Cuando el abastecimiento a la población se da por medio de un sistema de agua potable que suministra el líquido vital a los domicilios, las precauciones necesarias para evitar el surgimiento de enfermedades de transmisión hídrica recaen en las autoridades responsables por el mantenimiento y operación del sistema. Aunque

el sistema de tratamiento haya sido diseñado de manera adecuada para una desinfección correcta, un cambio en el agua cruda captada puede significar la necesidad de tomar otras medidas, por lo que el monitoreo constante, tanto de los parámetros del agua que sale de las plantas y el agua llegando a los domicilios, como el monitoreo de la salud pública de la población abastecida son fundamentales.

El concepto de múltiples barreras para el tratamiento es la clave de la producción de agua potable segura. Las barreras se seleccionan de modo que se dupliquen las capacidades de eliminación de los diferentes pasos del proceso de tratamiento. Como resultado, se puede lograr un funcionamiento continuo a pesar de las fluctuaciones normales en el rendimiento, que incluirán períodos de ineficacia. Además, la presencia de múltiples barreras minimiza la posibilidad de que los contaminantes pasen a través del sistema de tratamiento y causen daño a los consumidores en caso de que una barrera falle. En capítulos anteriores se han estudiado las diferentes etapas, aunque se suele considerar la etapa de desinfección como la más importante para la inactivación de patógenos, otras etapas del tratamiento pueden trabajar para ese mismo fin, como se muestra en la tabla 1.

4.4 Formas de desinfección del agua en plantas de tratamiento

De los varios pasos en el proceso de potabilización del agua, al que más se le asocia con la prevención de enfermedades transmitidas por el agua es la etapa de desinfección. Aunque, en la práctica, las etapas previas a la desinfección son importantes para la eliminación de patógenos de mayor tamaño, el uso de desinfectantes tiene como objetivo principal limitar las enfermedades transmitidas por el agua e inactivar los organismos patógenos y prevenir su aparición o rebrote en las cuencas y los sistemas de distribución (van Dijk, 2004). Los tres mecanismos principales de inactivación de patógenos son:

- Destruir o deteriorar la organización estructural celular atacando los principales componentes celulares, como destruir la pared celular o deteriorar las funciones de las membranas semipermeables.
- Interferir con el metabolismo que produce energía a través de sustratos enzimáticos en combinación con grupos prostéticos de enzimas, haciendo que las enzimas no sean funcionales.
- Interferir con la biosíntesis y el crecimiento impidiendo la síntesis de proteínas normales, ácidos nucleicos, coenzimas o la pared celular.

4.5 Desinfectantes más comunes

Cloro

Puede aplicarse en diferentes puntos: en el almacenamiento de agua bruta, en la pre-coagulación/pos-coagulación, almacenamiento, pre-sedimentación/pos-coagulación, pos-sedimentación/pre-filtración, pos-filtración (desinfección), o en el sistema de distribución.

Ventajas

- Oxida el hierro soluble, el manganeso y los sulfuros.
- Mejora el color, el sabor y el olor.
- Puede mejorar la coagulación y la filtración de las partículas contaminantes.
- Es un biocida eficaz.
- Es el método de desinfección más fácil y menos costoso sin importar el tamaño del sistema.
- Es el método de desinfección más utilizado y, por tanto, el más conocido.
- Está disponible en forma de hipoclorito de calcio y de sodio. El uso de estas soluciones es más ventajoso para los sistemas más pequeños que el cloro gaseoso porque son más

fáciles de usar, son más seguras y necesitan menos equipo en comparación con el cloro gaseoso.
- Proporciona cloro residual.

Desventajas

- Puede causar un deterioro en la coagulación/filtración de las sustancias orgánicas disueltas.
- Forma subproductos.
- El agua terminada podría tener problemas de sabor y olor, dependiendo de la calidad del agua y de la dosificación.
- El gas cloro es un gas peligroso y corrosivo.
- Podrían ser necesarias instalaciones especiales de contención de fugas y de depuración para el cloro gaseoso.
- Normalmente, el hipoclorito de sodio y de calcio son más caros que el cloro gaseoso.
- El hipoclorito de sodio es un producto químico corrosivo que se degrada con el tiempo y con la exposición a la luz.
- El hipoclorito de calcio debe almacenarse en un lugar fresco y seco debido a su reacción con la humedad y el calor. Además, puede formar un precipitado a causa de las impurezas, por lo que puede ser necesario un producto químico antiincrustante.
- Las concentraciones más altas de soluciones de hipoclorito son inestables y producirán clorato como subproducto.
- Es menos eficaz con un pH elevado.
- Forma subproductos oxigenados que son biodegradables y que pueden potenciar el crecimiento biológico posterior si no se mantiene el residuo de cloro.
- Libera componentes ligados al sistema de distribución (por ejemplo, arsénico) al cambiar el estado redox.

Ozono

Para la desinfección primaria, la adición de ozono debe ser antes de la biofiltración/filtración y después de la sedimentación. Para la

oxidación, la adición de ozono puede ser anterior a la coagulación/sedimentación o la filtración, dependiendo de los componentes a oxidar.

Ventajas

- Es más eficaz que el cloro, las cloraminas y el dióxido de cloro para la inactivación de virus, cryptosporidium y giardia.
- Oxida el hierro, el manganeso y los sulfuros.
- Puede mejorar el proceso de clarificación y la eliminación de la turbidez.
- Controla el color, el sabor y los olores.
- Es uno de los desinfectantes químicos más eficaces, el ozono requiere un tiempo de contacto muy corto.
- En ausencia de bromuro, los sustitutos del halógeno. No se forman DBP.
- Tras la descomposición, el único residuo es el oxígeno disuelto.
- La actividad biocida no está influenciada por el pH.

Desventajas

- Se forman DBP.
- El coste inicial de los equipos de ozonización es elevado.
- La generación de ozono requiere mucha energía y debe generarse *in situ*.
- Altamente corrosivo y tóxico.
- Se necesitan filtros biológicamente activados para eliminar el carbono orgánico asimilable y los DBP biodegradables.
- Se descompone rápidamente en un pH y temperaturas altas.
- No proporciona ningún residuo.
- Requiere un mayor nivel de mantenimiento y habilidad del operador.

UV

Los sistemas de desinfección por luz ultravioleta (UV) transfiere energía electromagnética al material genético del organismo patógeno, cuando la radiación UV penetra la pared de la célula, destruye su habilidad de reproducción. Es preferible aplicar la radiación UV antes del sistema de distribución (EPA, 1999).

Ventajas

- No requiere la adición de productos químicos que puedan afectar el sabor, el olor y el color o que deban purificarse más adelante.
- No genera subproductos de desinfección.
- Varias áreas de aplicación y eficaz en la inactivación de virus, esporas y quistes.
- Funciona de forma rápida (requiere un menor tiempo de contacto), segura y es fácil de usar y mantener.
- Por ser un proceso físico, no requiere la generación, manejo, transporte o almacenamiento de químicos peligrosos o corrosivos.
- Capacidad para inactivar protozoarios como cryptosporidium y giardia.
- Coste energético relativamente bajo.
- No requiere mucho espacio en planta.

Desventajas

- Requiere la cantidad adecuada de energía para ser eficaz.
- Eficaz para los microorganismos, no para minerales u otros elementos químicos.
- Algunos organismos pueden reparar el daño fotoquímico causado por los rayos ultravioleta.
- Requiere etapas adicionales para retirar los microorganismos inactivos.
- Requiere un plan de mantenimiento preventivo.

- Turbiedad y sólidos suspendidos totales pueden hacer inefectiva a la desinfección.
- Costo de operación y construcción mayor a la cloración.
- Se requieren medidas de seguridad para los operadores, para evitar daños a los ojos y la piel.
- Al no generar material desinfectante residual, la recontaminación (ingreso de agua no tratada en cualquier punto del sistema) puede representar un riesgo a la salud. Por esto, es necesario tener sistemas de monitoreo confiables y completos.

Dióxido de cloro

En las plantas de tratamiento convencionales, el dióxido de cloro es utilizado para la oxidación y se introduce en el agua cruda o en los tanques de sedimentación. Para limitar la demanda de oxidante y, por tanto, la dosis de dióxido de cloro y la formación de clorito, se suele añadir dióxido de cloro después de la sedimentación (American Water Works Association, 2009).

La preocupación por las posibles quejas sobre el sabor y el olor ha limitado el uso del dióxido de cloro para proporcionar un residuo de desinfección en el sistema de distribución. En consecuencia, los proveedores de agua que están considerando el uso de dióxido de cloro para aplicaciones de oxidación y desinfección primaria pueden considerar las cloraminas para la desinfección secundaria.

Ventajas

- Más eficaz que el cloro y las cloraminas para la inactivación de virus, cryptosporidium y giardia.
- Oxida el hierro, el manganeso y los sulfuros.
- Puede mejorar la clarificación del proceso de desinfección del tratamiento del agua potable.
- El sabor y los olores resultantes de las algas y la vegetación en descomposición, así como los compuestos fenólicos, son controlados por el dióxido de cloro.

- En condiciones de generación adecuadas (es decir, sin exceso de cloro), no se forman subproductos.
- Es fácil de generar.
- Las propiedades biocidas no se ven influidas por el pH.
- Proporciona material desinfectante residual.

Desventajas

- Puede formar subproductos específicos clorito y clorato.
- La eficiencia del generador y la dificultad de optimización pueden hacer que se alimente un exceso de cloro en el punto de aplicación, lo que puede generar subproductos.
- Los costes asociados a la formación, el muestreo y las pruebas de laboratorio para el clorito y el clorato son elevados.
- Costo operacional elevado.
- El gas de dióxido de cloro es explosivo, por lo que debe generarse y medirse *in situ.*
- El dióxido de cloro se descompone con la luz solar.
- Puede dar lugar a la producción de olores nocivos en algunos sistemas.

La siguiente tabla muestra un pequeño resumen de la efectividad de los diferentes tipos de desinfectantes:

Tabla 6
Efectividad de los desinfectantes por grupo de microorganismo

Grupo de patógeno	Cloro libre	Cloro combinado	Dióxido de Cloro	Ozono	UV
Virus	+++	++	++++	++++	++
Bacteria	++++	+++	++++	++++	+++
Protozoario	+	+	++	++++	++++

Nota. ++++ Excelente +++ Bueno ++ Regular + Malo
Adaptado de (Percival *et al.*, 2004).

En el tratamiento del agua, se cree que los principales factores que controlan la eficiencia de la desinfección son:

- Capacidad del desinfectante para oxidar o romper la pared celular.
- Capacidad del desinfectante para difundirse en la célula e interferir con la actividad celular.
- Tiempo de contacto del desinfectante.
- Concentración del desinfectante.
- Temperatura del agua.

4.6 Dosificación de desinfectantes

Para poder medir la eficacia, y consecuentemente determinar la dosis adecuada, de un desinfectante, es necesario medir la presencia de patógenos en el agua. En la práctica, es inviable contar cada célula microbiana individual de una muestra de agua, por lo que se usa el concepto de unidad formadora de colonias (CFU) es una unidad de medida que se emplea para la cuantificación de microorganismos. Al diluir una muestra y esparcirla por una placa de Petri, los microbiólogos pueden contar grupos de microbios, llamados colonias. Se supone que cada colonia ha crecido a partir de una única CFU.

Asimismo, se calcula y reporta los cambios en las CFU después de la desinfección, y, en lugar de indicar la magnitud del cambio en las CFU individuales, se suele expresar el desempeño como una reducción porcentual en términos de un factor de reducción y, por conveniencia, se usa un factor de reducción logarítmico. En la siguiente tabla podemos observar la reducción esperada de varios patógenos con diferentes etapas de tratamiento. Es importante notar que las reducciones dependen de las características específicas del proceso, incluidos los tiempos de detención, el tamaño de los poros, la profundidad del filtro, el desinfectante.

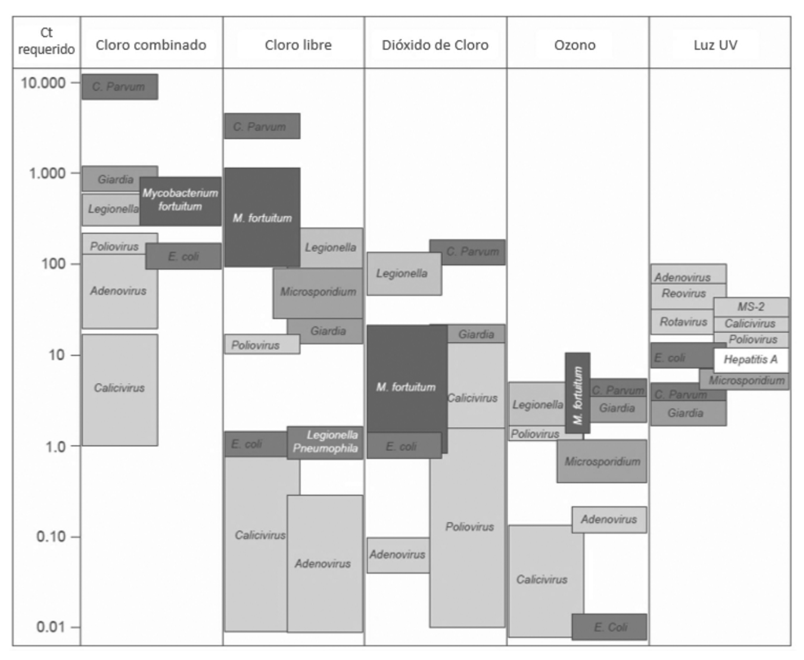
Tabla 7
Reducciones logarítmicas indicativas

Tratamiento	Escherichia coli	Bacteria (incl. Campylobacter)	Virus (incl. adenovirus, rotavirus y enterovirus)	Bacteriófago	Giardia	Cryptosporidium	Clostridium perfringens	Helmintos
Tratamiento primario	0–0.5	0–0.5	0–0.1	N/A	0.5–1.0	0–0.5	0–0.5	0–2.0
Tratamiento secundario	1.0–3.0	1.0–3.0	0.5–2.0	0.5–2.5	0.5–1.5	0.5–1.0	0.5–1.0	0–2.0
Filtración por membrana	3.5–>6.0	3.5–>6.0	2.5–>6.0	3–>6.0	>6.0	>6.0	>6.0	>6.0
Osmosis inversa	>6.0	>6.0	>6.0	>6.0	>6.0	>6.0	>6.0	>6.0
Cloro	2.0–6.0	2.0–6.0	1.0–3.0	0–2.5	0.5–1.5	0–0.5	1.0–2.0	0–1.0
Ozono	2.0–6.0	2.0–6.0	3.0–6.0	2.0–6.0	N/A	N/A	0–0.5	N/A
Luz UV	2.0–>4.0	2.0–>4.0	>1.0 adenovirus >3.0 enterovirus, hepatitis A	3.0–6.0	>3.0	>3.0	N/A	N/A

Nota. N/A = no disponible
Adaptado de (National Water Quality Management Strategy NWQMS, 2006).

Los valores Ct son una parte importante del cálculo de la dosis de desinfectante para la cloración del agua potable. Este valor representa la concentración de desinfección residual C (mg/L) multiplicado por el tiempo de contacto t (min)] (Crittenden *et al.*, 2017), se expresa normalmente en unidades de mg-min/L. En la figura 2 podemos observar los valores de Ct necesarios para una inactivación del 99 % de diferentes patógenos. Debido a que actualmente no se puede garantizar la ausencia total de patógenos en el agua potable (riesgo cero), este criterio ha sido reemplazado por la definición de un nivel de riesgo aceptable o tolerable, en este caso una inactivación del 99 %.

Figura 3
Requisitos de desinfección para una inactivación del 99 % (min mg/l o mJ/cm²)



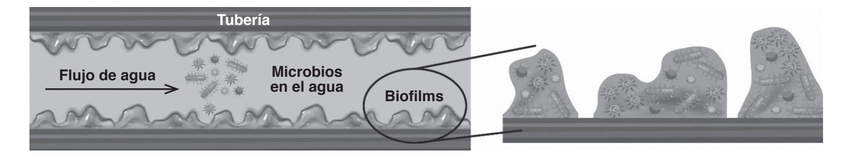
Nota. Adaptado de (Crittenden *et al.*, 2017).

4.7 Redes de distribución de agua potable y biofilm

El sistema de distribución de agua potable es un medio ideal para el crecimiento de microorganismos. El biofilm puede definirse como un consorcio microbiano que se adhiere a las superficies bióticas o abióticas (como tuberías, filtros o tanques) y que puede actuar como sitios de atenuación para los patógenos transmitidos por el agua (Priya *et al.*, 2021).

A pesar de que el biofilm puede albergar una amplia gama de microorganismos, son las bacterias las que sientan las bases de la ciudad microbiana. A diferencia de los virus y protozoarios, solo las bacterias y las algas tienen la capacidad de formar biopelículas de forma activa al adherirse a las superficies y secretar "pegamento" en forma de exopolisacáridos. Sin embargo, esta capa viscosa puede ofrecer un refugio para los organismos que no pueden formar activamente biopelículas, incluidos virus y protozoos o bacterias con una débil capacidad de formación de biopelículas. En última instancia, se crea una comunidad microbiana compleja a través del apego continuo y la interacción entre especies, que alberga una amplia gama de microorganismos, posiblemente incluidos los patógenos (Percival *et al.*, 2004).

Figura 4
Formación de biofilm en tubería



El entorno de la biopelícula proporciona una serie de ventajas decisivas que incluyen una mayor supervivencia en condiciones adversas, una mayor resistencia al estrés, la interacción con otros microorganismos y el intercambio de material genético, una mayor potencia metabólica y una mayor aptitud y virulencia. Es por esto que, un constante monitoreo y mantenimiento de redes es siempre recomendado.

Capítulo 5

Importancia de la agricultura en el aprovechamiento del recurso agua

5.1 Introducción

Tras el fin de la Segunda Guerra Mundial se impulsó la agricultura intensiva en los países del primer mundo para responder a la gran demanda de productos agrícolas para satisfacer su demanda. A mediados de la década de los años 80 se identificó el fracaso de la llamada revolución verde, lo que llevó a la necesidad de revisar su relación con el cuidado del medioambiente y, en general, con la naturaleza.

Así, la Organización de las Naciones Unidas, a través de FAO, tiene siete áreas fundamentales que se mencionan a continuación, con las que apoya a todas las naciones en relación con la importancia de la agricultura y sus actividades conexas.

- Facilita el acceso a la información técnica para transitar a una agricultura sostenible.
- Asesorar a los gobiernos para la implementación de políticas encaminadas a una agricultura sostenible.
- Fortalecer la colaboración pública privada para el mejoramiento de la agricultura a pequeña y mediana escala.

- Implementar a través de los ministerios de agricultura de las naciones, seminarios de capacitación de nivel parcelario.
- Implementar a través de los ministerios de agricultura de las naciones, seminarios sobre la gestión de riesgos.
- Luchar contra el hambre a nivel mundial, especialmente en las naciones en vías de desarrollo.
- Conseguir la seguridad alimentaria en todas las naciones y permitir que las grandes potencias económicas apoyen a los países más pobres.

Es necesario mencionar que la agricultura orgánica ha sido impulsada con éxito en nuestro país, lo que ha permitido incrementar la oferta de productos de exportación, entre los que podemos mencionar:

- Banano
- Cacao de aroma
- Flores
- Camarón
- Café
- Palma africana
- Cítricos
- Quinua
- Caña de azúcar
- Mango
- Sábila
- Hortalizas
- Mora
- Arazá
- Plátano
- Achiote
- Cereales
- Chamburo
- Flores tropicales
- Guayaba

- Amaranto
- Papaya
- Hongos silvestres

La agricultura orgánica se basa en dos principios fundamentales: el primero es mantener la fertilidad del suelo, considerando que es un ser vivo donde millones de seres permiten el desarrollo de las plantas; y el segundo es la existencia de una biodiversidad donde millones de seres vivos comparten la naturaleza en un perfecto equilibrio.

5.2 Historia de la evolución de la agricultura

Las labores agrícolas en las primeras civilizaciones iniciaron en el Neolítico, las actividades depredadoras de la naturaleza como la caza fueron progresivamente sustituidas por las labores productivas relacionadas con la agricultura. Esto provocó que las antiguas civilizaciones dejen de ser nómadas y se conviertan en sedentarias y productoras de alimentos.

La agricultura primitiva se caracterizó por la recolección semillas, que eran transportadas a lugares muy apartados, dando lugar a la producción de nuevas especies, algunas de ellas con mejores características que las originarias. De esta época también se tiene constancia de las primeras deforestaciones debido al avance de la actividad agrícola, y se construyeron e inventaron las primeras herramientas utilizadas en las labores agrícolas, como las primitivas azadas para cortar y cosechar.

De esta época primitiva también se tiene información sobre los antiguos jardines colgantes de Babilonia a las orillas del río Éufrates, famosos por haber sido los propulsores de los cultivos hidropónicos de las plantas. Además, hay que indicar que los primeros sistemas de riego aparecieron en esta época, cuando se construyeron los primeros canales de riego y embalses.

La revolución en las actividades agrícolas tuvo lugar con el aparecimiento de los metales en los que la civilización romana introdujo nuevas formas en el arado, las presas de aceite, los nuevos sistemas de riego regionales, el abondo, el barbecho y la rotación de los cultivos. Los principales cultivos de la civilización romana eran el trigo, el olivo, la vid y las leguminosas.

Cabe anotar además que en la Edad Media se produjeron aún más adelantos en las labores agrícolas, entre los más importantes podemos mencionar: la introducción de la rueda de las labores agrícolas, la rotación trienal que consistía en trabajar con tres terrenos, dos con cultivos de cereales y el otro con barbecho.

En épocas modernas, la agricultura se caracteriza por la integración económica mundial, que ha permitido el intercambio de productos de todos los continentes, y entre los productos con mayor demanda están: el trigo, la vid, la caña de azúcar, el algodón, el café, el cacao, el maíz, la patata, el tomate y el pimiento. La nueva tendencia a nivel mundial es la agroecología.

5.3 Rol de la agricultura en la protección de la erosión en cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas sufren procesos erosivos por la acción del viento (erosión eólica) o por la acción de la escorrentía superficial de las aguas que provienen de las lluvias (erosión hídrica). A nivel mundial se estima que 513 millones de hectáreas son afectadas por la eólica y 478 millones de hectáreas son afectadas por la erosión hídrica.

Cuando consideramos las estrategias para la conservación del suelo, el principal objetivo no es retener cada partícula de suelo dentro del campo, sino limitar su pérdida a unas tasas que no pongan en peligro la productividad del suelo; es decir, mantener el suelo como recurso útil y permanente.

Es necesario tener en cuenta las siguientes medidas que los agricultores podrían considerar para mitigar el impacto de la erosión eólica:

- Realizar el labrado del terreno en dirección del viento dominante, lo cual implica que se realice durante cinco días la medición de dirección y velocidad del viento en el área del proyecto.
- Proteger las zonas de producción agrícola por medio de cortinas naturales contra vientos dispuestos en dirección del viento predominante, es recomendable utilizar árboles de gran follaje.
- Mantener en las zonas de producción un adecuado equilibrio entre las plantas herbáceas (girasol, caléndula, petunia, maíz, altramuz, peonía, delfinio) y las plantas leñosas (roble, pino, palmera tropical, algarrobo, arándano, frambuesa, lavanda, uva, madre selva roja).

A continuación se describe cada principio para garantizar una agricultura conservacionista:

- Mantener el suelo con cobertura vegetal.
- Aumentar la capacidad de infiltración del agua en el suelo.
- Manejar adecuadamente la escorrentía.
- Evitar y reducir la contaminación ambiental.
- Aumentar la materia orgánica y la fertilidad del suelo.
- Aumentar la productividad en la finca.

Algunas prácticas agroecológicas que podemos considerar para aumentar la cobertura vegetal son las siguientes:

- Sembrar sobre el rastrojo del cultivo anterior.
- Utilizar cultivos de cobertura. Ejemplo: mucuna, canavalia.
- Sembrar cultivos intercalados entre los camellones del área del proyecto. Ejemplo: maíz y frijol, café joven asociado

con frijol, mango asociado con sandía, frutales asociados con pasto, cítricos y frijol.

- Utilizar herramientas para la siembra que corten el rastrojo dejándolo sobre la superficie del suelo. Ejemplo: matraca, sembradora directa de tracción animal y mecánica.
- Utilizar la cobertura como una forma de control de las malas hierbas.
- Para controlar las malezas utilizar implementos como la motoguadaña, flecha y el machete.

Capítulo 6

Glosario de términos

No.	Términos	Significado
1	Ablandamiento	Es un proceso técnico que se aplica en las plantas de tratamiento con la finalidad de reducir el porcentaje de calcio y/o magnesio.
2	Actuador	Es un instrumento electrónico que se utiliza en la línea de tratamiento del agua cruda cuya finalidad es transformar la acción generada por el controlar en una acción.
3	Agitación hidráulica	Es la unidad hidráulica como la canaleta Parshall es la más utilizada en planta de tratamiento, cuya finalidad es producir turbulencia en el agua cruda con la finalidad de introducir el sulfato de aluminio para la producción de flóculos.
4	Agitación mecánica	Es la unidad mecánica cuya finalidad es producir turbulencia en el agua cruda para de introducir el sulfato de aluminio para la producción de flóculos al ingreso de la unidad de floculación.
5	Acuífero artesiano	Es un afloramiento natural del agua con una cierta presión debido a que el agua en el confinamiento se encuentra a un mayor nivel topográfico. Son los manantiales u ojos de agua que se les conoce popularmente.
6	Acuífero libre	Es una fuente de agua subterránea que se encuentra a presión atmosférica, es decir, para su aprovechamiento es necesario colocar una bomba mecánica. Posee una zona totalmente saturada por lo que el nivel freático fluctúa en función de la cantidad de lluvia que se tenga en la zona de influencia.

7	Acuitardo	Es un volumen muy grande de agua subterránea que descansa en formaciones geológicas semipermeables que transmiten el agua muy lentamente. Estas formaciones geológicas no son aprovechadas para consumo humano.
8	Agua cruda	Se denomina así al agua que se encuentra sin tratamiento para que sea aprovechada por el hombre, pueden provenir de fuentes superficiales y subterráneas.
9	Agua dura	Es aquella agua que se caracteriza por su alto contenido de minerales, en particular sales de magnesio y calcio. La dureza del agua se expresa como la cantidad equivalente de carbonato de calcio.
10	Aireación	Es el primer proceso en la línea de tratamiento del agua cruda, consiste en introducir cantidades importantes de oxígeno al agua con el objetivo de oxigenarla y mejorar sus características físicas químicas.
11	Aireador	Es la primera unidad de una planta de tratamiento de agua potable que permite la oxigenación del agua para mejorar sus características físicas químicas. Se dispone de diferentes tipos como el de bandejas y el de cascada.
12	Alcalinidad	Es la capacidad que presenta el agua para neutralizar los ácidos y se encuentra íntimamente relacionado con el contenido de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos, boratos, silicatos y fosfatos. Las unidades que se expresa la alcalinidad es [mg / litro].
13	Análisis físico químico del agua	Son procesos que se llevan a cabo en los laboratorios de agua respetando procesos ya establecidos de acuerdo con normas internacionales cuyo objetivo es conocer las características físicas y químicas del agua.
14	Análisis microbiológico del agua	Son procesos que se llevan a cabo en los laboratorios de agua respetando procesos ya establecidos de acuerdo con normas internacionales cuyo objetivo es conocer si existen o no la presencia de microorganismos en el agua a ser tratada.
15	Análisis organoléptico	Son procesos que se llevan a cabo en los laboratorios de agua respetando procesos ya establecidos de acuerdo con normas internacionales cuyo objetivo es determinar el olor, el sabor y la presencia de material flotante.

16	Boquilla	Es un dispositivo que se utiliza en las plantas de tratamiento de agua cuyo objetivo es incrementar la velocidad de flujo, puede ser utilizado para crear un resalto hidráulico.
17	Calibración	Se refiere a procedimientos establecidos en las normas internacionales para verificar o rectificar la graduación de un instrumento de precisión.
18	Calidad del agua	Es un procedimiento realizado en el laboratorio de aguas cuyo objetivo es comparar los resultados físicos químicos y bacteriológicos de una muestra de agua con los estándares establecidos en las normas de calidad internacional.
19	Calidad de medida	Es la metodología por la cual se realiza una serie de medidas con la finalidad de permitir a un instrumento medir la variable observada.
20	Capacidad de almacenamiento	Es el volumen de un tanque de agua con la finalidad de garantizar la normal distribución de agua potable considerando que en su diseño se debe considerar la población futura.
21	Capacidad hidráulica	Se refiere al caudal máximo que puede acoger una estructura hidráulica sin que eso signifique pérdida de eficiencia en su funcionamiento.
22	Carbón activado	Es un tipo de carbón natural altamente absorbente que se utiliza en la unidad de aireación de las plantas de tratamiento de agua potable con la finalidad de remover el mal olor y sabor del agua.
23	Caudal de diseño	Es el caudal calculado para el diseño de las estructuras hidráulicas considerando la población futura en el área del proyecto, por lo general se considera 30 años.
24	Clarificación	Es un proceso que se utiliza en las plantas de tratamiento con la finalidad de separar los sólidos de la masa de agua por acción de la fuerza de gravedad.
25	Cloración	Con la finalidad de desinfectar y oxidar compuestos indeseables presentes en el agua que proviene de la unidad de filtración, se añade cloro gas en dosificación previamente definida.

26	Cloro residual	Es el porcentaje de cloro añadido a la masa del agua con la finalidad de garantizar condiciones físico químico y bacteriológico a nivel residencial.
27	Controlador	Es un elemento electrónico que se añade al sistema de distribución de agua potable con la finalidad de comprobar de manera automática las señales de control.
28	Cuerpo de agua	Es la acumulación natural o artificial de importantes volúmenes de agua dulce que puede ser aprovechada de forma sustentable para proyectos de agua potable.
29	Desarenador	Es una unidad hidráulica que se localiza en captaciones superficiales, cuyo objetivo es permitir la remoción de arenas y sólidos mediante la aceleración de la gravedad.
30	Densidad	Es un parámetro muy utilizado en el diseño hidráulico de las unidades de coagulación y sedimentación y es la relación entre la masa de la partícula para su volumen.
31	Desinfección	Es un proceso físico químico utilizado en las plantas de tratamiento de agua potable cuyo objetivo es la eliminación de organismos patógenos presentes en el agua.
32	Desinfectante	Es una sustancia química utilizada para la eliminación de microorganismos patógenos, estas sustancias son almacenadas en ambientes especiales.
33	Difusor	Dispositivo mecánico utilizado en la unidad de coagulación cuya finalidad es dispersar un fluido en otro.
34	Dosificación	Es una cantidad predeterminada de producto químico que se coloca en el agua con la finalidad de aportar a su desinfección.
35	Dosis óptima	Es la cantidad de sulfato de aluminio que se podría utilizar en el proceso de coagulación y floculación, la cantidad óptima puede ser determinada por modelos de correlación entre variables como regresiones lineales o regresiones polinomiales.
36	Dotación	Es la cantidad de agua potable que necesita una persona para satisfacer sus necesidades básicas durante un día, el valor de este parámetro se encuentra en función de las condiciones climáticas del lugar del proyecto.

37	Dureza del agua	La dureza del agua se encuentra íntimamente ligado con el contenido de alto niveles de minerales por lo general es calcio y magnesio. En el trabajo cotidiano de las plantas de tratamiento de agua potable se considera agua dura aquella que contiene más de 120 mg/litro de CaCO3.
38	Ensayos con trazador	Es un método utilizado en investigaciones de acuíferos con métodos hidrodinámicos que permite conocer el tiempo de tránsito del trazador, la concentración máxima que presentaría el flujo.
39	Ensayos de tratabilidad	Al momento que se encuentra diseñando una planta de tratamiento es necesario realizar un ensayo de tratabilidad a nivel de laboratorio de aguas con la finalidad de definir los procesos y operaciones necesarias en la planta.
40	Filtración	Es un proceso que se considera en la planta de tratamiento de agua potable cuyo principal objetivo es la separación de sólidos en suspensión por medio de un medio mecánico.
41	Filtración lenta	Es una alternativa para eliminar los sólidos en suspensión de una masa de agua mediante una velocidad de circulación relativamente baja que es obligada a atravesar una capa de arena cumpliendo el objetivo propuesto en las plantas de tratamiento.
42	Filtración rápida	Es una alternativa para la eliminación de sólidos en suspensión de una masa acuosa mediante una velocidad de circulación relativamente alta que es obligada a atravesar un mecanismo previamente establecido. Esta metodología brinda mayor eficiencia en las plantas de tratamiento de agua potable.
43	Floculación	Es una unidad de tratamiento de las plantas de tratamiento de agua potable cuyo principal objetivo es mediante un proceso químico la aglutinación de partículas coloidales con la finalidad de permitir su decantación y posterior filtrado.
45	Índice coliforme	Es un índice utilizado en el proceso de tratamiento de agua potable que nos indica las características bioquímicas de ciertas bacterias que se encuentran en el agua.

Referencias bibliográficas

American Water Works Association (2009). *Selecting Disinfectants in Security-Conscious Environment.*

CDC (2021). *Water and COVID-19 FAQs.* https://bit.ly/3JK3tgA

Crittenden, J. C., Rhodes Trussell, R. Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2017) *MHW´s Water Treatment Principles and Design.*

EPA (1999) 'Wastewater technology fact sheet, Ultar-violet disinfection', pp. 1-7.

Funari, E., Manganelli, M., & Sinisi, L. (2012). 'Impact of climate change on waterborne diseases', *Annali dell'Istituto Superiore di Sanità, 48*(4), 473-487. http://dx.doi.org/10.4415/ANN_12_04_13.

Liu, L., Johnson, H., Cousens, S., Perin, J., Scott, S., Lawn, J., Rudan, I., Campbell, H., Cibulskis, R., Li, M. Mathers, C., Black, R., Child Health Epidemiology Reference Group of WHO & UNICEF (2012). 'Global, regional, and national causes of child mortality: An updated systematic analysis for 2010 with time trends since 2000', *The Lancet, 379*(9832), 2151-2161. http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60560-1.

National Water Quality Management Strategy NWQMS (2006). 'Australia Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks (Phase 1)', *National Water Quality Management Strategy*, p. 415.

Percival, S., Embrey, M., Sellwood, J., Chalmers, R., Hunter, P., & Wyn-Jones, P. (2004). *Microbiology of Waterborne Diseases: Microbiological Aspects and Risks, Microbiology of Waterborne Diseases: Microbiological Aspects and Risks.* http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-551570-2.X5000-9.

Priya, A., Swetha, T. K., & Pandian, S. K. (2021). *Antimicrobial peptides as a potent therapeutic regimen to quench biofilm-mediated antimicrobial resistance, Microbial and Natural Macromolecules.* Elsevier Inc. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-820084-1.00021-1.

van Dijk, J. C. (2004). 'Drinking water treatment technology-Handout', *TU Delft*. https://bit.ly/3H8JZAc

WHO (2021). *Coronavirus disease (COVID-19) advice for the public*. https://bit.ly/3JKdU3G

Woodward, M. (2013). *Epidemiology Study Design and Data Analysis*. CRC Press.

Carrera de Ingeniería Ambiental

Teniendo en cuenta la importancia de la calidad del agua potable para el consumo humano, los autores de esta obra han realizado esta recopilación basada en bibliografía seleccionada, así como en experiencias en el ámbito de la docencia y la vinculación con la colectividad en la Universidad Politécnica Salesiana.
En esta publicación se abordan cinco temas: El agua en la naturaleza, Química acuática, Planta de tratamiento de agua potable, Epidemiología hídrica y prevención de enfermedades de transmisión hídrica y La importancia de la agricultura en el aprovechamiento del recurso agua. Además, una descripción detallada de la metodología de diseño de las unidades de tratamiento de una planta de agua potable considerando su utilidad en la enseñanza universitaria.





ISBN 978-9978-10-637-2



